



# DIAGNÓSTICO DE INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA RÍO BLANCO, POR MEDIO DEL SWAT.

TRABAJO DE GRADO POR :  
MANUELA GIRALDO DUQUE,  
MARÍA CAMILA LÓPEZ ARCILA.



Universidad  
Católica  
de Manizales

**DIAGNÓSTICO DE INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL MODELAMIENTO  
HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA RÍO BLANCO, POR MEDIO DEL SWAT.**

**MANUELA GIRALDO DUQUE  
MARÍA CAMILA LÓPEZ ARCILA**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
MANIZALES**

**2018**

**Diagnóstico de información requerida para el modelamiento hidrológico de la  
Microcuenca Río Blanco, por medio del SWAT.**

Manuela Giraldo Duque

María Camila López Arcila

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingenieras Ambientales

Ángela María Álzate Álvarez

Docente - Tutora

Universidad Católica de Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Programa Ingeniería Ambiental  
Trabajo de grado  
Manizales, 2018

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	11
1.1. RESUMEN .....	12
ABSTRACT .....	13
1.2. INTRODUCCIÓN .....	14
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	16
1.5. OBJETIVOS .....	18
1.5.1. Objetivo General.....	18
1.5.2. Objetivos Específicos.....	18
1.6. MARCO TEÓRICO.....	19
1.6.1. Antecedentes.....	19
1.6.1.1. Antecedentes a nivel internacional.....	19
1.6.1.2. Antecedentes Nacionales.....	23
1.6.2. Marco Conceptual.....	28
1.6.3. Marco Normativo.....	29
1.6.4. Marco Geográfico .....	31
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	36
2.1. Fase 1. Revisión de temas requeridos por ArcSWAT.....	37
2.2. Fase 2. Recopilación de información secundaria.....	38
2.3. Fase 3: Evaluación y análisis de la calidad de la información seleccionada....	40
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	44
3.1. Fase I: Revisión de requerimientos de ArcSWAT.....	44
3.1.1. Descripción General del SWAT .....	44
3.1.2. Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico .....	45
3.1.3. Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico.....	48
3.1.4. Datos de entrada del modelo SWAT .....	50

3.1.5. Datos de salida del modelo SWAT .....	54
3.2. Fase II: Recopilación de información secundaria del área de estudio. ....	55
3.2.1. Información espacial.....	56
3.2.2. Información temporal.....	74
3.3. Fase III: Evaluación y análisis de la calidad de la información seleccionada...	79
3.3.1. Información espacial.....	79
3.3.2. Información temporal.....	86
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES .....	99
CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES .....	102
BIBLIOGRAFÍA .....	104
ANEXOS .....	107



## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1. Localización de la Cuenca Río Blanco.</i>	32
<i>Figura 2. Resumen del procedimiento metodológico.</i>	37
<i>Figura 3. Operación en la calculadora ráster.</i>	40
<i>Figura 4. Demostración de “raster calculator” final.</i>	41
<i>Figura 5. Simulación hidrológica.</i>	44
<i>Figura 6. Representación del balance hidrológico.</i>	46
<i>Figura 7. Procesos de corriente modelados por SWAT.</i>	49
<i>Figura 8. Parametrización de suelos según la SSURGO.</i>	52
<i>Figura 9. Parametrización de suelos según STATSGO.</i>	52
<i>Figura 10. Transformación del sistema de coordenadas del DEM.</i>	56
<i>Figura 11. Modelo de elevación digital (DEM) – Reserva forestal protectora Río Blanco.</i>	57
<i>Figura 12. Porcentaje de uso y cobertura del suelo</i>	59
<i>Figura 13. Uso y cobertura del suelo.</i>	60
<i>Figura 14. Mapa de usos del suelo.</i>	61
<i>Figura 15. Porcentaje de usos de suelo.</i>	62
<i>Figura 16. Mapa de suelos.</i>	67
<i>Figura 17. Porcentajes de unidades cartográficas, en el área de estudio.</i>	69
<i>Figura 18. Mapa Geológico.</i>	71
<i>Figura 19. Porcentajes de unidades litológicas, en el área de estudio.</i>	73
<i>Figura 20. Estaciones y pluviómetros seleccionados.</i>	75
<i>Figura 21. Polígonos de Thiessen final.</i>	76
<i>Figura 22. Vista de perfil de un sumidero antes y después de ser corregido.</i>	79
<i>Figura 23. Vista de perfil de un pico antes y después de ser corregido.</i>	80
<i>Figura 24. Vista 3D, DEM sin corregir.</i>	80
<i>Figura 25. Vista 3D, DEM corregido.</i>	81
<i>Figura 26. Mapa red de drenajes microcuenca Río Blanco.</i>	82
<i>Figura 27. Códigos de la dirección de flujo.</i>	82
<i>Figura 28. Mapa dirección de flujos Microcuenca Río Blanco.</i>	83
<i>Figura 29. Flow direction Vs. Flow accumulation.</i>	84
<i>Figura 30. Mapa de Flujo acumulado microcuenca Río Blanco.</i>	85
<i>Figura 31. Sobreposición de red de drenajes recopilada Vs. red de drenajes creada.</i>	86
<i>Figura 32. Cantidad de datos vs. Promedio de temperatura (°C), estación “Mirador”.</i>	87
<i>Figura 33. Promedio de temperatura (°C), estación “Mirador”. Fuente: Autores.</i>	88
<i>Figura 34. Climograma estación “Mirador” período 2006-2016. Fuente: Autores.</i>	89
<i>Figura 35. Climogramas año 2007 y 2008, correspondientes al evento climático “La Niña”.</i>	90

<i>Figura 36. Climograma año 2010, correspondiente al evento climático "La Niña".</i>	<i>91</i>
<i>Figura 37. Climograma año 2011, correspondiente al evento climático "La Niña".</i>	<i>92</i>
<i>Figura 38. Climograma año 2012, correspondiente al evento climático "El Niño".</i>	<i>93</i>
<i>Figura 39. Climograma año 2015, correspondiente al evento climático "El Niño".</i>	<i>94</i>
<i>Figura 40. Análisis de doble masa de estaciones meteorológicas.</i>	<i>95</i>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<i>Tabla 1. Orden de sistema hidrológico.....</i>	32
<i>Tabla 2. Drenajes de la cuenca Rio Blanco. ....</i>	33
<i>Tabla 3. Caudales cuenca Rio Blanco. ....</i>	33
<i>Tabla 4. Clasificación de uso y cobertura en SWAT. ....</i>	40
<i>Tabla 5. Requerimientos ArcSWAT.....</i>	51
<i>Tabla 6. Archivos de texto y tablas en ArcGIS, tabla de localización.....</i>	53
<i>Tabla 7. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, tabla de atributos de uso del suelo. ...</i>	53
<i>Tabla 8. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, atributos de suelo.....</i>	54
<i>Tabla 9. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, datos de precipitación. ....</i>	54
<i>Tabla 10. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, datos de temperatura.....</i>	54
<i>Tabla 11. Salidas del SWAT. ....</i>	55
<i>Tabla 12. Información espacial y temporal.....</i>	55
<i>Tabla 13. Tipos de cobertura vegetal se la Microcuenca Río Blanco.....</i>	58
<i>Tabla 14. Cobertura vegetal.....</i>	59
<i>Tabla 15. Código SWAT para cobertura vegetal. ....</i>	60
<i>Tabla 16. Usos del suelo.....</i>	62
<i>Tabla 17. Propiedades físico-químicas UMBRIC VITRANDEPTS. ....</i>	63
<i>Tabla 18. Propiedades físico-químicas HYDRIC DYSTRANDEPTS.....</i>	63
<i>Tabla 19. Propiedades físico-químicas LITHIC TROPORTHENTS. ....</i>	64
<i>Tabla 20. Modificación de tabla de atributos de suelos.....</i>	65
<i>Tabla 21. Rangos por pendiente y erosión.....</i>	66
<i>Tabla 22. Unidades cartográficas del área de estudio. ....</i>	68
<i>Tabla 23. Diagnóstico de información de suelos.....</i>	70
<i>Tabla 24. Distribución de unidades litológicas del área de estudio. ....</i>	72
<i>Tabla 25. Estaciones meteorológicas de la zona de estudio.....</i>	74
<i>Tabla 26. Datos faltantes de estación meteorológica "Mirador".....</i>	77
<i>Tabla 27. Datos faltantes del pluviómetro Río Blanco.....</i>	79
<i>Tabla 28. Promedios de temperaturas medias registradas en la estación "Mirador" (2006-2015).....</i>	89
<i>Tabla 29. Métodos para completar series de datos meteorológicos. ....</i>	96



## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Glosario .....	107
Anexo B. Tabla de recopilación de información.. .....	109
Anexo C. Formato tabla localización.....	109
Anexo D. Formato de la tabla atributos de Uso del Suelo (.dbf) .....	110
Anexo E. Formato de tabla de atributos de suelo .....	110
Anexo F. Formato de la tabla (2 campos) .....	110
Anexo G. Formato de tabla (3 campos). .....	111
Anexo H. Polígonos de Thiessen de las estaciones y pluviómetros .....	112
Anexo I. Datos faltantes del pluviómetro Martinica .....	113
Anexo J. Datos faltantes del pluviómetro Mirador .....	113
Anexo K. Demostración de acumulación de flujo .....	114
Anexo L. Estación pluviométrica base.....	114
Anexo M. Climograma año 2006.....	115
Anexo N. Climograma año 2009. ....	115
Anexo O. Climograma año 2013. ....	116
Anexo P. Climograma año 2009. ....	116



# CAPÍTULO I. GENERALIDADES.



Universidad  
Católica  
de Manizales

## 1.1. RESUMEN

La conservación de la Microcuenca Río Blanco es vital para garantizar el futuro abastecimiento de agua en la población de Manizales; allí radica la importancia del conocimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca y sus posibles predicciones. Este trabajo, vinculado al Semillero de Investigación en Gestión Integral del Patrimonio Hídrico, tiene como objetivo realizar el diagnóstico de información secundaria de la Microcuenca Río Blanco, con base en los requisitos de entrada del software de modelamiento hídrico SWAT. Los modelos hidrológicos son herramientas que aportan a la toma de decisiones para la adecuada gestión del recurso hídrico, pues simulan la realidad y predicen factores importantes que pueden variar y tener efecto sobre la unidad hidrológica.

Para el desarrollo del trabajo se ejecutaron tres fases: Durante la primera se realizó una revisión bibliográfica en la cual se destacaron los conceptos básicos del SWAT, su funcionamiento, la información requerida para las entradas y los resultados que arroja el modelo; la segunda fase se basó en la recopilación de la información climática, fisiográfica y geológica del área de estudio obtenida de la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) y el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, también se llevó a cabo la adecuación de la información secundaria acercándose a los requisitos del software, teniendo en cuenta la condición de escasez de información detallada y actualizada en el contexto local; como fase final se evaluó la calidad de la información seleccionada empleando sistemas de información geográfica y herramientas de Excel.

**Palabras clave:** *Modelamiento hidrológico, SWAT, información secundaria, Sistemas de Información Geográfica.*

## ABSTRACT

The conservation of the Microbasin Río Blanco is vital to guarantee the future water supply of the population of Manizales; there takes root the importance of the knowledge of the hydrologic processes that happen in the basin and its possible predictions. The main point in this work is to realize the diagnosis of secondary information of the Microbasin Río Blanco (Caldas), based on the SWAT entry requirements. The hydrologic models are hardware that reach port to the decision making for the suitable management of the water resource, since they simulate the reality and predict important factors that can have effect on the hydrologic unit.

For the development of the work three phases were executed: during the first one there was realized a bibliographical review in which there stood out the basic concepts of the SWAT, its functioning, the information needed for the earnings and the results that model throws. The second phase was based on the compilation of the climatic information, physiographic and geologic of the obtained area of study of the Autonomous Regional Corporation of Caldas (Corpocaldas) and the Institute of environmental studies (IDEA) of the National University of Colombia in Manizales. There was carried out the adequacy of the secondary information approaching the requisites of the software, bearing in mind the condition of scarcity of information detailed and updated in the local context; as final phase evaluated the quality of the chosen information using geographical information systems and Excel.

**Keywords:** *Hydrological model, SWAT, secondary information, geographic information systems.*

## 1.2. INTRODUCCIÓN

Colombia se caracteriza por ser uno de los países con mayor riqueza en recursos hídricos debido a su localización geográfica y orografía, así como a la gran diversidad de regímenes climáticos que aportan un significativo patrimonio hídrico nacional; sin embargo, al analizar detalladamente las poblaciones y sus actividades económicas, que evidencian un incremento en los impactos antrópicos sobre el recurso hídrico, se nota la constante disminución de oferta hídrica disponible en las fuentes pertenecientes a las áreas de influencia directa de su desarrollo, lo cual destaca una disminución en la disponibilidad del recurso y una clara generación de necesidades hídricas insatisfechas en los ecosistemas.

La cuenca hidrográfica se constituye como una unidad territorial en la cual se genera una sinergia de factores y elementos tanto espaciales como sociales que permiten abarcar de una manera integral la comprensión de la unidad de análisis (República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2013); esta interacción continua entre diferentes elementos puede generar alteraciones en el comportamiento y estado del cuerpo hídrico, como es el caso del área de estudio, la cual presenta afectaciones en cuanto a generación de caudales, probablemente por las actividades productivas de la zona, llevadas a cabo en la subcuenca alta del Río Chinchiná, teniendo repercusiones en esta microcuenca.

La inexistencia de estudios y análisis sistemáticos que demuestren el impacto que tiene el uso del suelo y sus variables relacionadas en la generación de caudales y sedimentos, aporta de manera indirecta al incremento de la problemática; son estudios fundamentales para detectar áreas en las cuales se podría intensificar la producción y delimitar nuevas áreas dedicadas a la conservación. Con base en esto, se sugiere emplear Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que como modelo hidrológico continuo, diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas, no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo, por el contrario, este modelo está basado en el balance hídrico y está en capacidad de determinar las entradas, salidas y almacenamiento de agua en la cuenca, además se emplea para simular el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos, entre otras características seleccionadas de acuerdo a la relevancia de estas en el área de estudio.

Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo ha sido: Diagnosticar la información secundaria con base en los requerimientos para el modelamiento hidrológico de la subcuenca Río Blanco por medio del software ArcSWAT.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La complejidad de las relaciones entre los diferentes factores, tanto físicos como antrópicos que configuran una cuenca hidrográfica, se constituye como la base del funcionamiento de la unidad de análisis (República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., 2013), en este caso la microcuenca Río Blanco.

La zona de estudio ya mencionada, se encuentra dentro de la Reserva Forestal Protectora de Río Blanco, “uno de los aspectos más importantes desde la perspectiva ambiental de la reserva para la región, constituye el hecho de suministrarle el agua a la ciudad de Manizales, en una proporción del 35% de la demanda” (Corpocaldas, 2010, p.21); Río Blanco se encuentra compuesta por los afluentes La Liberia, Martinico, Hoyo Grande, Las Palomas, Boquerón, Calvarios, Pinares, La Guerra, La Ye, Olivares y Río Blanco; en particular los últimos cinco afluentes presentan unas características de variabilidad del caudal que no corresponden al comportamiento hídrico promedio en años anteriores. En el año 2010, la Corporación Autónoma Regional de Caldas-CORPOCALDAS realizó el Plan de Manejo de la reserva, que contiene su caracterización y diagnóstico, en el cual se destaca el aporte de la reserva al alto valor para la biodiversidad de la región, así como la provisión de servicios ambientales para el municipio de Manizales.

En esta zona estratégica se encuentran predios particulares, sumando así una presión de crecimiento demográfico en zonas cercanas y diferentes sistemas productivos, lo cual incrementa la vulnerabilidad y pone en riesgo la estabilidad y conservación de la reserva. En contexto con lo anterior, se evidencia la necesidad de generar insumos que aporten a la investigación de causas en la variación de caudales y un monitoreo constante para la verificación del estado de los afluentes de la Microcuenca Río Blanco, que garantice su preservación y una vigilancia frente a las actividades antrópicas dentro de la reserva. Por tanto, el planteamiento del presente proyecto es la apertura hacia el modelamiento hídrico para la previsualización de futuros posibles en el análisis de la cuenca y la exploración de los factores que se relacionan directamente con esa variación del caudal.

Se plantea entonces el diagnóstico de información secundaria de la información climática, fisiográfica y geológica como paso inicial para una futura implementación del modelo SWAT, herramienta que predice el impacto de las prácticas de manejo de suelo en la generación de agua y sedimentos (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010), realizando un aporte a la investigación de la zona y fomentando el uso de herramientas que permitan un análisis integral y la probabilidad de generar predicciones que aporten a la toma de decisiones sobre la zona de estudio.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN

Las áreas de importancia ambiental en las zonas urbanas se caracterizan por su potencial para proveer bienes y servicios ecosistémicos a la población, siendo su preservación, fundamental para el equilibrio del territorio y la supervivencia de los que lo habitan. El incremento en la deforestación para el desarrollo de diferentes actividades antrópicas, amenaza de manera constante estas áreas que se convierten en áreas de interés ambiental por albergar múltiples especies de flora y fauna importantes para la región.

Corpocaldas, en el Diagnóstico Ambiental de la Reserva Forestal Protectora realizado en el año 2010, menciona que hace alrededor de “300 años la región aún conservaba gran parte de su cobertura boscosa original, conectando los ecosistemas altos andinos con los del páramo, hecho que facilitaba la movilidad de la fauna y potencializaba el intercambio genético entre las especies de flora; sin embargo, en la actualidad, como consecuencia de la deforestación acelerada, los parches de bosque andino se han convertido en pequeñas islas que sirven de refugio a diferentes especies de fauna y crean centros de micro diversidad y endemismo” (p.13); esta es la esencia de las islas urbanas. Su importancia radica en la significativa oferta hídrica que proporciona al municipio de Manizales.

Partiendo del Decreto-Ley 2811 de 1974, artículo 206 en el cual se establece la denominación de “áreas de reserva forestal, como la zona de propiedad pública o privada reservada para destinarla exclusivamente al establecimiento o mantenimiento y utilización racional de áreas forestales productoras, protectoras o productoras-protectora” (República de Colombia, 1974), se instauran las áreas de reserva forestal de protección, además de administración y protección de suelos. En relación con lo anterior, para ejercer la protección de un área de importancia ambiental, es necesario realizar estudios que aporten al análisis del estado de estos ecosistemas e identificar los elementos que intervienen en la oferta hídrica para la conservación de los recursos naturales y procesos hidrológicos.

El incremento de la deforestación y la expansión urbana, el cambio climático y las actividades antrópicas que se presentan en la actualidad en los alrededores de la Reserva Forestal Protectora, generan una amenaza para el cuerpo hídrico Río Blanco desequilibrando el ciclo hidrológico regular de la zona; es por este motivo que, en los últimos años diferentes entidades han realizado esfuerzos para la reforestación y conservación del área de la cuenca que representa mayor importancia para la oferta hídrica de Manizales. A pesar de estos esfuerzos, algunos de los afluentes principales de la cuenca presentan variaciones en el caudal, modificando así la oferta hídrica.



De acuerdo a lo anterior, es necesario implementar el principal instrumento para la gestión integral del patrimonio hídrico, el cual se basa en la adecuada planificación hidrológica mediante herramientas tales como los modelos hidrológicos, debido a que en estos se logra integrar diferentes variables para generar una simulación hidrológica en la cual interviene la información relevante de la zona de estudio. SWAT se basa en un balance hídrico, en el cual se determinan las entradas, las salidas e incluso el flujo de retorno de la cuenca, este modelo es estructurado en principios físicos; sin embargo, es necesario preparar la información espacial y temporal, tal como: propiedades físicas del suelo, topografía, cobertura vegetal, clima, precipitaciones, entre otras, de acuerdo a las necesidades del estudio. Esto debido a que SWAT cuenta con múltiples aplicaciones, dentro de las cuales se encuentran:

- Apoyo a toma de decisiones, planificación y regulación ambiental.
- Análisis de escenarios sociales-ecológicos.
- Simulación, manejo y evaluación de cambios climáticos.
- Simulación en producción de sedimentos.

Este proyecto exploratorio – descriptivo, pretende evaluar la información disponible del área de estudio, partiendo de un diagnóstico de información secundaria y la revisión detallada de los requerimientos del software, logrando finalmente la evaluación de la calidad de la información obtenida. Adicionalmente, se emplean herramientas como ArcGIS y Excel, generando así un aporte significativo en la comprensión del modelamiento hídrico para aplicar a futuro y contribuir en términos de gestión y conservación de la Microcuenca Río Blanco.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo General**

Realizar un diagnóstico de la información secundaria con base en los requerimientos para el modelamiento hidrológico de la microcuenca Río Blanco por medio del software ArcSWAT.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Revisar los requerimientos necesarios para emplear el software ArcSWAT con el fin de realizar un modelamiento hidrológico de la microcuenca Río Blanco.
- Recopilar y seleccionar información secundaria teniendo en cuenta las características climáticas, fisiográficas y geológicas del área de estudio.
- Evaluar y analizar la calidad de la información seleccionada, por medio de diferentes herramientas que proporcionan ArcGIS y Excel.

## **1.6. MARCO TEÓRICO**

### **1.6.1. Antecedentes**

Los estudios a nivel nacional e internacional permiten contextualizar las aplicaciones y el avance que se ha generado en materia de modelación de cuencas hidrográficas a través de SWAT; una herramienta que ha evolucionado a través del tiempo y que extiende su variedad de aplicaciones hacia la gestión del recurso hídrico. El modelo hidrológico SWAT se emplea en la actualidad para generar conocimiento sobre la afectación de usos de suelo y cobertura vegetal en la producción de sedimentos y oferta hídrica, modificaciones en la calidad del agua por el uso de insumos agroquímicos en zonas de cultivo, afectación de cuencas hidrográficas en las que se desarrollan actividades de minería, entre otros.

#### **1.6.1.1. Antecedentes a nivel internacional**

Con el objetivo de identificar a nivel internacional los avances y aplicaciones del modelo SWAT y obtener unas referencias sólidas que aporten al presente proyecto, se enuncian algunas de las investigaciones realizadas para el análisis de cuencas hidrográficas por medio del modelo; destacando de esta manera sus metodologías. Con base en una revisión bibliográfica exhaustiva se identificó que el SWAT ha sido implementado en: América latina (CIAT, 2010), Estados Unidos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 1998), Australia (Watson, 2003), Europa (Abbaspou, 2015), entre otros. Los antecedentes seleccionados se desarrollaron en el contexto de México; los Andes Venezolanos y Ontario, Canadá. Estos trabajos fueron elegidos debido a su contexto y fecha de realización; la cuenca El Tejocote ubicada en México tiene características de agricultura de ladera y esto tuvo una incidencia directa en la producción de sedimentos y escurrimientos; la cuenca alta del Río Chama en Venezuela, se encuentra ubicado en los Andes Venezolanos, que establece similitudes con respecto a la topografía del área de estudio del presente proyecto, además, el modelo se ejecuta sin hacer ajustes ni calibraciones en un contexto de escasez de información; finalmente, la aplicación del SWAT en Ontario, Canadá, es un trabajo publicado recientemente y da un enfoque diferente a la herramienta pues predice la variación temporal de las áreas que contribuyen al flujo durante tormentas de lluvia.

En el Estado de México, (Velázquez, 2015) emplea el modelo SWAT en la simulación de producción de sedimentos y escurrimientos superficiales para un periodo de siete años, esto, fundamentado en la importancia de dos características específicas: la cobertura vegetal y el uso del suelo; aplicado a la cuenca El Tejocote, la cual se encuentra ubicada

en los municipios de Acambay, Atlacomulco y Temascalcingo, cuya actividad económica principal es la producción agrícola. En el desarrollo de la investigación, se plantea como propósito la generación de diferentes alternativas de uso de suelo y manejo del recurso hídrico y finalmente, se obtiene el modelo calibrado y validado como una herramienta recomendable para aplicar en cualquier cuenca que posea unas características similares. Para lo anterior, utilizó tres fases metodológicas así:

1. Caracterización geomorfológica de la cuenca hidrográfica: donde se consideran las características físicas de la cuenca hidrográfica el Tejocote (Km<sup>2</sup>), tales como: la definición del área el perímetro (Km), la pendiente (%), la red de drenaje (modelo de drenaje) y forma de la cuenca.
2. Datos para alimentar el modelo SWAT: Para esta fase utilizó la extensión ArcSWAT ArcGis para el procesamiento de información, la cual “es un paquete de análisis de datos geográficos diseñados para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante de simulaciones usando las características principales de ArcGIS” (Arnold, 1998, p.35). Para generar la delimitación de la zona, ArcGis requiere una información cartográfica como el Modelo de Elevación Digital del terreno (DEM), la cobertura y uso del suelo y la clasificación del suelo; para el procesamiento de datos de entrada tuvieron en cuenta archivos WGN (Generadores climáticos), archivos SUB (Datos generales de las URH), archivos SOL (Datos de suelos), archivos MGT (Datos del manejo de cultivos), archivo RTE (Datos del cauce), archivo PND (Datos de cuerpos de agua), archivo GW (Datos de aguas subterráneas).
3. Calibración y validación: La calibración consistió en realizar un ajuste de variables que consiste en analizar la sensibilidad de parámetros que afectan el modelo de manera directa y clasificarlos en grado alto, medio y bajo. Los principales parámetros que se ajustaron fueron: disminuir e escurrimiento superficial, se disminuyeron los días para aumentar la rapidez en la filtración del agua, se incrementó el factor para disminuir el flujo de retorno, se aumentó la evaporación y se disminuyó la percolación, se retomó el valor más valor para aumentar al máximo la recarga de acuíferos profundos, se incrementó la profundidad de suelos, disminuyó la capacidad hidráulica de los suelos y disminuyó el escurrimiento lateral. La validación del modelo consistió en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período diferente del utilizado en la calibración.

Al finalizar el proyecto (Mociño, 2015) obtuvo 698 Unidades de Respuesta Hidrológica, para un total de 29 sub-cuencas, en base a los resultados concluye que las sub-cuencas

que más incidencia tienen en la producción de sedimentos y escorrentía son principalmente aquellas ocupadas por agricultura de ladera. Se establece como exitoso el resultado del modelo hidrológico de la cuenca el Tejocote, ya que los resultados obtenidos con el SWAT2010 coinciden con la información de fuentes oficiales.

El Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP) de la Universidad de Los Andes y Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Experimental del Táchira Venezuela (2009), realizaron una interesante aplicación del modelo SWAT 2000 en los Andes Venezolanos, específicamente en la cuenca del río Chama, en el estado de Mérida. Aplicaron el modelo sin ningún tipo de calibración, validación ni ajustes y con datos de entrada básicos sin levantamientos de campo, es decir, destacando la escasez de información existente en este país y las limitaciones que esta conlleva (Barrios & Urribarr, 2009). La estrategia metodológica se redujo a los siguientes pasos:

- Definición del área de estudio, la cual incluye localización geográfica, área y perímetro de la cuenca, altitudes, pendientes, temperatura promedio, y límites de la cuenca.
- La preparación de datos de entrada al modelo incluye la realización del modelo de elevación digital (DEM) a partir de las curvas de nivel, la hidrografía digital de la cuenca que se dividió en 16 sub-cuencas; por medio de diferentes fuentes de información realizaron el mapa de suelos, emplearon un mapa de cobertura y uso de la tierra de la Universidad de los Andes, las coberturas se agruparon en seis clases, posterior a esto se reclasificaron según las clases de cultivo de la base de datos SWAT, considerando comportamientos hidrológicos similares. Finalmente, recopilaron datos diarios de precipitaciones y datos diarios de temperatura máxima y mínima.
- Para los criterios de evaluación del desempeño del modelo, compararon de manera gráfica los resultados obtenidos en la simulación con datos de una estación limnigráfica; para evaluar el desempeño del modelo. Barrios y Urribarr (2009) calcularon el coeficiente de determinación  $R^2$  y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE, Nash-Sutcliffe Efficiency), además de estos dos coeficientes, los autores calcularon tres estadísticos, basados en las medidas adimensionales de error, los cuales fueron: Sesgo porcentual (PBIAS, Percent Bias), Persistencia de la eficiencia del modelo (PME, Persistence Model Efficiency) y la Relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR, RMSE-observations Standard deviation Ratio), los cuales se determinan mediante unas expresiones estadísticas que relacionan los datos observados y los simulados, arrojando valores que indican el nivel de satisfacción del modelo.

- Finalmente, realizaron la modelación inicial y al obtener el resultado ajustaron el parámetro SLSUBBSN (longitud promedio del flujo en vertientes), posterior a esto no realizaron ningún otro ajuste.

A pesar de que Barrios y Urribarr (2009), no realizaron calibración ni validación del modelo, concluyeron que SWAT realizó una exitosa simulación de la escorrentía mensual de la cuenca y al mismo tiempo se encontró un bajo desempeño del modelo en cuanto a simulación de escorrentía diaria de la cuenca.

En febrero del 2017 fue aceptado por la Revista de Hidrología (Journal of Hydrology), el estudio *“La Predicción de la variación temporal de las áreas que contribuyen al flujo utilizando SWAT”*, realizado por la Universidad de Guelph, el Ministerio de Ambiente y Cambio Climático y la Autoridad de Conservación de Ausable Bayfield de Ontario, Canadá. Esta investigación fue desarrollada con el objetivo de implementar un modelo integrado enfocado en la predicción de las dinámicas temporales y espaciales de las áreas potenciales que contribuyen al flujo en la Cuenca Hidrográfica del Arroyo Gully en Ontario, utilizando un mecanismo de Área de Contribución Potencial (PCA) variable en el tiempo y el modelo SWAT (Golmohammadi, Rudra, Dickinson, Goel, & Veliz, 2017). Los objetivos desarrollados fueron básicamente tres:

- Realizar una descripción general de la herramienta SWAT y destaca los componentes hidrológicos que requiere el modelo, tales como la infiltración, escorrentía superficial, drenajes, flujo base, entre otros.
- Definir el área de estudio, describir la ubicación de la cuenca del Arroyo Gully, que se encuentra en la costa del Lago Huron, con un área de 10,5 Km<sup>2</sup>, su topografía y descripción general de usos de la tierra en la zona objeto de estudio.
- Por último, realizar el ingreso de parámetros de entrada al software, dentro de los cuales incluyen: el modelo de elevación digital (DEM), tipo de suelo, usos de suelo, la red de drenajes; todo esto obtenido de fuente del ministerio de Recursos Naturales de Ontario. Realizaron la estimación del potencial de evapotranspiración (PET), aunque el Potencial de evapotranspiración puede ingresarse como entradas diarias o mensuales, los datos de flujo superficial fueron recolectados de cinco estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de la cuenca el flujo también se observó en 16 estaciones de monitoreo durante 6 eventos diferentes.

El modelo SWAT predijo el caudal en la salida de la cuenca, con eficiencias de Nash-Sutcliffe mensuales y diarias de 0,75 y 0,60 durante el período de validación. El modelo validado se utilizó para la simulación del flujo en las estaciones de monitoreo. Delinearon

99 microcuencas, con mayor eficiencia, con el propósito de predecir las áreas de potencial contribución de flujo con el modelo. En general, los eventos de flujo fueron sobrestimados por SWAT. Se usó un índice de precipitación actual para simular el cambio continuo del contenido de agua en el suelo durante cada tormenta y los resultados del modelado de los eventos individuales se utilizaron para explorar la capacidad del modelo para predecir la variación temporal de las áreas que contribuyen al flujo durante cada evento. Los resultados revelaron que el modelo SWAT sobrepredice las áreas que contribuyen al flujo de eventos con menor precipitación; Mientras que para los eventos con mayor cantidad de lluvia el modelo simula de cerca el área de contribución variable en el tiempo (Golmohammadi et al., 2017).

### **1.6.1.2. Antecedentes Nacionales**

Cabe mencionar que en Colombia, no han sido muchos los estudios realizados en relación con el modelo hidrológico SWAT; sin embargo, los estudios existentes son de gran importancia y calidad entorno a esta temática. Estos informes y trabajos fueron seleccionados, por la claridad y detalle del procedimiento metodológico desarrollado entorno al SWAT, de acuerdo a datos de entrada y configuración del modelo. A continuación se enunciarán algunos de los estudios de mayor relevancia a nivel nacional, en los cuales se estudiaron las cuencas de departamentos tales como: Boyacá, Cesar, y Cundinamarca, se seleccionaron estos departamentos de acuerdo a la complejidad presente en sus áreas problemáticas relacionadas con el planteamiento del presente trabajo, respectivamente en estas áreas se demuestra explotación de sedimentos de fondo, priorización de zonas potenciales para la producción de sedimentos e impacto del uso de la tierra en generación de caudales. Finalmente estos trabajos desean apoyar la planificación, conservación, manejo y restauración de las cuencas y sus ecosistemas de importancia estratégica para la población.

En el año 2010, fue creado un informe por parte del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en este se expone la aplicación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), con la finalidad de evaluar el impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos; en la cuenca del Río Tunjuelo – Cundinamarca, el cual hace parte de la gran cuenca del Río Bogotá. Para llevar a cabo el modelamiento, se cuantificaron todas las variables del balance hídrico del flujo de agua en el suelo y agua en la vegetación para un período diario de 11 años (1999-2009). (CIAT , 2010)

Para el análisis de la cuenca se recolectó y estructuró la siguiente información:

Uso de suelo actual: se emplearon los datos obtenidos en el Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca del Río Tunjuelo y como base la cartografía generada por el Instituto



Geográfico Agustín Codazzi; además de tener en cuenta la clasificación y nomenclatura de la metodología Corine Land Cover (CLC). Teniendo en cuenta la información especificada anteriormente, se logró considerar un alto grado de degradación en la cuenca media y alta del Río Tunjuelo, por los efectos de los sistemas de producción agropecuarios. (CIAT, Rivera, & Valencia, 2010)

Modelo Digital de Elevación (DEM): este es necesario para calcular la red hídrica de la cuenca y se empleó el DEM obtenido en el Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca del Río Tunjuelo (POMCA Tunjuelo) (CIAT et al., 2010)

Datos de precipitación, temperatura máxima y mínima diaria: fue suministrada información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Se realizó una revisión de los datos de las estaciones, para seleccionar finalmente las estaciones que contaban con datos diarios y se encentraran dentro de la cuenca o aledañas a la zona de estudio. (CIAT et al., 2010)

Datos de caudales diarios: La información de datos medios diarios de caudales, se emplearon para realizar la calibración y validación del modelo; de esta manera para calibrar se emplearon los datos la estación que se encontraba a la salida de la cuenca, sin embargo, también se incluyeron estos datos para realizar el procedimiento de validación y los datos de las estaciones distribuidas en las diferentes vertientes de la cuenca se emplearon únicamente para validar. (CIAT et al., 2010)

Información de suelos: Al igual que el uso de suelo actual y el MDE, esta información se obtuvo del POMCA Tunjuelo; aunque carecía de información sobre las variables de conductividad, densidad aparente, disponibilidad de agua en el suelo, porcentaje de carbono y de granulometría. La cual es indispensable para la modelación hidrológica en SWAT; por lo tanto, se determinaron sus valores empleando el triángulo textural y la herramienta “Soil Characteristics Tool” (Saxton 1986).

Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH): Se ingresó la información de suelos, uso del suelo, clima, relieve y red de drenaje, lo cual hizo posible analizar variables hidrológicas de la cuenca, debido a que estas variables son el resultado de la interacción agua-suelo-clima-uso-relieve. Por esta razón se generan diferentes combinaciones que dan resultado a porciones del territorio con un comportamiento hidrológico específico denominado Unidades de Respuesta Hidrológica URH, para lo cual fue necesario subdividir la cuenca en microcuencas y posteriormente en estas definir las URH.

Una vez obtenida y estructurada la información existente, se llevó a cabo la siguiente metodología:

- a. Análisis de sensibilidad, el cual identifica los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales.
- b. Calibración del modelo, se realiza con la finalidad de lograr un ajuste satisfactorio entre los datos medidos y los simulados, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo, con un período de calibración de 5 años de observación (2000-2004).
- c. Validación del modelo, para evaluar la capacidad predictiva mediante la comparación de los datos medidos y simulados para un período de 5 años de observación (2005-2009). (CIAT et al., 2010)

Finalmente, calibrado el modelo, se crearon escenarios en los cuales se logró simular el comportamiento de la microcuenca con diferentes condiciones de uso de suelo que podrían presentarse en un futuro, con el fin de analizar cuál es el impacto presente en la producción de sedimentos y caudales en la cuenca (CIAT et al., 2010). Además con los resultados del modelamiento hidrológico, se logró identificar la contribución de sedimentos y agua al caudal, teniendo en cuenta cada una de las URH en el período simulado de 11 años, es decir, en cuanto al agua aportada al caudal por URH, se tuvo en cuenta el promedio multianual (1999-2009) de la producción de agua en (mm), en donde se consideró como variable ligada a esta esta significativa producción de caudal, la precipitación, aportando promedios multianuales significativos en 14 estaciones, que se encuentran distribuidas en partes alta y baja de la cuenca. Por otro lado, en cuanto a la producción de sedimentos anual por cada URH, se definieron como áreas de mayor producción pastos, cultivos (papa), explotaciones mineras (consideradas como las que más aportan sedimentos) y otros cultivos transitorios.

El programa de especialización en recursos hídricos de la Universidad Católica de Colombia, de la ciudad de Bogotá D.C en el año 2015, fue liderado un trabajo realizado por Diana A. Hernández, empleando el programa SWAT para la estimación de parámetros morfométricos y respuesta del sistema hídrico ante procesos hidrológicos por medio de indicadores descriptivos que permitan generar estrategias de planificación para la cuenca del río Ráquira, del departamento de Boyacá. (Hernández, 2015)

Para lograr tal objetivo, se tuvo en cuenta información cuantitativa y cualitativa para generar la estructura necesaria de información de datos de entrada, empleados en la etapa posterior al modelo hidrológico SWAT para la simulación en la producción de sedimentos y/o variación de los caudales en el sistema de referencia. En cuanto a la información cuantitativa, se usaron tablas de atributos para conocer cobertura y tipo de suelo y para información cualitativa datos espaciales de cobertura vegetal, DEM, y tipo de suelos para generar así las URH. En el trabajo también se tuvieron en cuenta otras herramientas de ArcGIS, con la finalidad de preparar los datos de entrada al modelo; por lo anterior, fue necesario recolectar, preparar y estructurar la información básica para ser ejecutado finalmente el modelo (Hernández, 2015). Una vez recolectada, preparada y

estructurada la información básica para aplicar el modelo hidrológico, se efectuó especial énfasis en las características de la cuenca, llevando a cabo los siguientes análisis:

- a) Morfometría de la cuenca: Al momento de tener en cuenta la morfometría de la cuenca, es importante resaltar, que la forma de una cuenca influye en la tasa en la que se suministra el agua al cauce principal durante todo el recorrido, es decir desde su punto inicial hasta su desembocadura; por lo tanto la forma se relaciona con el comportamiento hidrológico de la cuenca (Hernández, 2015) siendo así, durante la elaboración del proyecto se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros morfométrico: Área, perímetro, índice de compacidad (Kc), Factor de forma (Ff) e Índice de alargamiento (La). De acuerdo a los anteriores parámetros (Ff y La), estos permiten describir características de la cuenca, por ejemplo, el primero está asociado a las crecidas y el segundo compara la tendencia de la cuenca a ser de forma alargada (Hernández, 2015).

Con los parámetros analizados en la investigación, Hernández (2015) logró concluir que el “sistema hídrico de la microcuenca del río Ráquira, se comporta como una cuenca de forma alargada con una respuesta rápida ante eventos torrenciales y con media-alta probabilidad de disponibilidad hídrica” (p.32), siendo una cuenca poco homogénea con fuertes procesos deposicionales.

- b) Características red de drenaje: de acuerdo a la red de drenajes de la cuenca los autores demuestran que esta se ha constituido como un sistema de drenajes de cuarto orden, logrando comprobar mediante la ley del orden de los ríos, que la mayor probabilidad de disponibilidad hídrica se presenta en los ríos de tercer orden; sin embargo la disponibilidad hídrica de la cuenca, se obtuvo mediante el coeficiente de bifurcación (Rb) que relaciona el número de cauces de un orden con el número de cauces de un orden superior. “De esta manera al conocer los Rb de cada uno de los órdenes y promediarlos se obtiene el valor representativo el cual por encima de este determina la disponibilidad hídrica de cada uno de los drenajes de orden respectivo.” (hernández, 2015, p.36)

En cuanto a la generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), Hernandez (2015), afirma que estas “son conformadas por áreas dispersas, desconectadas entre sí pero que mantienen propiedades hidrológicas comunes relacionando pendiente, elevación, tipo de suelo, uso de cobertura vegetal, cobertura vegetal y otros” (p.39).

Según el estudio al sobreponer la información necesaria para desarrollar el modelo, se obtuvo como resultado la generación de 170 URH, permitiendo este modelo la visualización espacial de la distribución de las URH en la cuenca del río Ráquira identificando estas por criterios de priorización, permitiendo dar un estimativo de las zonas más vulnerables para la producción de sedimentos. Para finalmente ejecutar una

estrategia aproximada de la planificación de la cuenca, dando respuesta a los objetivos planteados por la PNGIRH, teniendo como información base las características morfométricas y la respuesta de la cuenca ante los procesos hidrológicos, se prosiguió con la identificación de actores claves, para relacionar adecuadamente las actividades productivas con los principales servicios ecosistémicos. (Hernández, 2015)

Finalmente, los autores propusieron una variedad de estrategias de planificación, donde los actores de las cuencas deben desenvolver el rol dentro de la gestión de cuencas y generar compromisos que mantengan la provisión de servicios por lo cual se deben desarrollar actividades de participación y sensibilización, donde reconozcan la importancia de la modificación de sus actividades hacia una vía de sostenibilidad. Lo anterior conlleva a generar acuerdos de corresponsabilidad entre los actores localizados en la parte alta de la cuenca y los actores aguas abajo, con el fin de mantener la producción de agua y retención de sedimentos junto con el aprovisionamiento de otros servicios ambientales.

En la Universidad de Manizales en el año 2016, fue llevado a cabo un trabajo de grado para optar al título de Especialista en Información Geográfica, por parte de Barbudo L., Ochoa J. y Acosta E. Donde aplicaron el modelo SWAT en el estudio hidrosedimentológico de la cuenca de la quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní, departamento del Cesar. Esto debido a que la cuenca hidrográfica, ha sido objeto de explotación de sedimentos de fondo en diversos tramos de esta, por lo menos durante 20 años; lo cual ha provocado cambios en el régimen hidrológico y de igual manera esto ha incidido en la producción y arrastre de sedimentos hacia la llanura aluvial, provocando el deterioro progresivo de la quebrada debido a la actividad de extracción de sedimentos sin conocer la verdadera naturaleza del régimen hidrosedimentológico, o de transporte de sedimentos en un flujo superficial, que gobierna la corriente en particular. (Barbudo, Daza y Acosta, 2016)

Por esta razón, se emplea el modelo SWAT en el trabajo investigativo, ya que se decidió emplear los conocimientos técnicos en la práctica, para aplicarlos así a los fenómenos naturales y antrópicos causados sobre las cuencas hidrográficas, teniendo como finalidad la implementación de esta herramienta para generar el modelamiento hidrológico y cálculo de la carga de sedimentos de la quebrada, para lograr lo anterior se localizaron geográficamente las zonas con mayor potencial de aportes de sedimentos para la cuenca, posterior a esto se configuraron los datos de entrada del modelo, siendo estos: Modelo de Elevación Digital (DEM) de 30 metros, uso actual del suelo: perteneciente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) realizado con la metodología Corine Land Cover, propiedades fisicoquímicas de los suelos, perfiles del suelo, y climatología. (Barbudo et al., 2016)

Una vez obtenida la información necesaria, se llevó a cabo la modelación, delineando la cuenca mediante el módulo Watershed Delineator donde se utilizó como información de entrada el modelo de elevación digital (DEM), seguido a esto se definieron los usos del suelo, suelos y pendientes en formato shapefile, continuando con la entrada de datos meteorológicos, para finalmente obtener la simulación de la carga total de sedimentos de la Quebrada San Pedro para un período de 23 años (1990 a 2013), recurriendo al manejo de tecnologías de información geográfica, tales como: SWAT y la extensión Arc Hydro Tools. Para obtener tal simulación, el cual era uno de los objetivos del trabajo, pero en conjunto con la información obtenida se logró obtener longitud del drenaje, precipitación acumulada anual, evapotranspiración real y potencial, escorrentía superficial, es decir un análisis de URH. Siendo así se obtuvo que la dinámica hídrica de la cuenca, estaba siendo alterada por actividades antrópicas como la minería y la agricultura en este caso.

### **1.6.2. Marco Conceptual**

En el Artículo 2.2.3.1.1.3. del Decreto 1076 de 2015, se define como cuenca hidrográfica, “el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas o directamente en el mar” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, p.270); un área geográfica en la cual se involucran y se desarrollan una serie de actividades y factores espaciales y sociales; los cuales son indicadores fundamentales para la evaluación y análisis del estado de los cuerpos de agua.

Las cuencas hidrográficas están en constante interacción con los sistemas físico, biótico, y socioeconómico; es por eso que, la alteración en cualquiera de estos componentes va a tener unas consecuencias concretas en el cuerpo de agua; “los cambios en el uso de los recursos naturales, principalmente la tierra, aguas arriba acarrearán una modificación del ciclo hidrológico dentro de la cuenca aguas abajo en cantidad, calidad, oportunidad y lugar” (Dourojranni, 2002, p.9).

La cobertura vegetal influye directamente en las condiciones y características variables de un cuerpo de agua. La cobertura vegetal es el resultado de la interacción entre los factores bióticos y abióticos sobre un área determinada, es decir, es el resultado de la asociación espacio-temporal de elementos biológicos vegetales característicos, los cuales conforman unidades complejas y funcionales (Subgerencia Cultural del Banco de la República, 2015).

Las características fisiográficas, geológicas y climáticas son determinantes en el estado de una cuenca hidrográfica; si se genera una modificación en alguna de estas características por medio de diferentes actividades antrópicas; puede generar alteraciones significativas en el caudal ecológico de la cuenca.

Se utilizan modelos hidrológicos con el objetivo de analizar la cuenca de manera integral y simplificada. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM define un modelo hidrológico como; una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica (IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014)

Una de las herramientas de apoyo para el estudio e investigación de cuencas hidrológicas, es el modelo hidrológico que se puede desarrollar por medio de un software. Según Estrela (1997), un modelo es una representación simplificada de una realidad compleja de forma que resulte adecuada para los propósitos de la modelización.

El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) “es un modelo determinístico semi-distribuido con un grado cognoscitivo conceptual o también conocido como caja gris - físicamente basado, desarrollado para predecir los impactos en las prácticas del manejo de los suelos y vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con diferentes suelos, uso del suelo y condiciones de manejo durante largos periodos” (Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, 2010).

SWAT, permite el modelamiento de varios procesos físicos diferentes, que suceden en una cuenca hidrográfica; durante la simulación, la cuenca es dividida en un número e sub-cuencas. La información de entrada es agrupada arrojando como un resultado las URH, las cuales son el área de tierra dentro de una sub-cuenca, que corresponde a todas las combinaciones únicas posibles de tierra, suelo y pendiente de cuenca (CIAT, 2010).

### **1.6.3. Marco Normativo**

Colombia ha desarrollado su normatividad ambiental partiendo desde la Cumbre de la Tierra en Estocolmo en el año 1972, en la cual surgió la declaración y el plan de acción sobre el medio ambiente humano, involucrando así por primera vez en la agenda política internacional la temática ambiental como limitadora en el uso de los recursos naturales, esta cumbre aportó la expedición de la ley 23 de 1973 en la cual se dictan disposiciones para la protección del medio ambiente y los recursos naturales.

La anterior ley conllevó a la expedición del Decreto-Ley 2811 de 1974, una de las repercusiones en Colombia de mayor relevancia, en la cual se establece el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables, con la finalidad de establecer el ambiente como patrimonio común, en donde el estado debe participar en su preservación y manejo en conjunto con los ocupantes del territorio, ya que el ambiente es de utilidad pública e interés social.

El Decreto-Ley 2811 de 1974 establece en el artículo 206 la denominación de áreas de reserva forestal, como la zona de propiedad pública o privada reservada para destinarla exclusivamente al establecimiento o mantenimiento y utilización racional de áreas forestales productoras, protectoras o productoras-protectoras. (República de Colombia, 1974), por medio de este Decreto ley se establecen las áreas de reserva forestal para la protección, además de administración y protección de suelos. De igual manera el Decreto-Ley 2811 de 1974 se encarga de regular todo lo relacionado con el uso y aprovechamiento del recurso hídrico.

Es de importancia destacar la repercusión que ocasionó la Cumbre de la Tierra llevada a cabo en Río de Janeiro el 3 de Junio de 1992, en la cual se realizó la declaración sobre el medio ambiente y el desarrollo sostenible, en la cual se genera para Colombia el documento Conpes el cual trata los aspectos de política ambiental para el país, siendo así se impulsa el proyecto para llevar a cabo la creación del ministerio de medio ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) mediante la ley 99 de 1993, la cual se encargó de reordenar el sector público en un sector que incluyera la adecuada gestión y conservación del medio ambiente y uno de sus aspectos de gran importancia fue el desarrollo de los postulados ambientales de la Constitución de 1991, la cual se basó en la creación de 49 artículos dirigidos a la protección del medio ambiente y los recursos naturales, razón por la cual se conoció esta como Constitución Verde o Ecológica.

Una vez contenidas en el país las bases para la legislación ambiental, se deben tener en cuenta que como Reserva Forestal Protectora Río Blanco fue declarada el 25 de Julio de 1990 por la Junta Directiva del INDERENA mediante acuerdo No.0027, avalada por el Ministerio de Agricultura mediante la resolución ejecutiva No. 66 del 6 de abril de 1992, ubicada en jurisdicción del municipio de Manizales. (Corpocaldas, 2010) por ende las normas relacionadas con el manejo adecuado de la Reserva Forestal Protectora de Río Blanco, son: La Ley 2° de 1959 en la cual se dictan las normas sobre reservas forestales y conservación de recursos naturales renovables, la Ley 12 de 1982 para las Zonas de Reserva Agrícola continuas a la zona urbana destinadas a la producción agropecuaria y forestal (República de Colombia, 1982), el Decreto 1640 de 2012 compilado en el Decreto 1076 de 2015, mediante el cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas (República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012), teniendo en cuenta así la



expedición del Decreto Único Reglamentario el Decreto 1076 de 2015 del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

#### **1.6.4. Marco Geográfico**

##### **Descripción de la zona de estudio, localización:**

La cuenca Río Blanco se encuentra dentro de la Reserva Forestal Protectora Río Blanco, la cual pertenece a la parte alta de la cuenca del Río Chinchiná, ubicada en la región centro-sur del departamento de Caldas, limitando con los municipios de Neira y Marulanda. Por sus características topográficas y de gran pluviosidad, se da origen a un gran número de quebradas y drenajes permanentes dentro de los cuales se encuentran los afluentes La guerra, La Ye, Olivares, Pinares y Río Blanco, con altitudes entre 1857 m.s.n.m y 3815 m.s.n.m. A la Reserva Forestal Protectora Río Blanco se puede acceder por tres puntos diferentes; por el sur desde el Barrio Minitas, el segundo acceso es por la Vereda Buena Vista y la tercer vía de acceso se da hacia el norte de Manizales, en el Alto del Guamo, Vereda de Hoyo Frío (Corpocaldas, 2010).

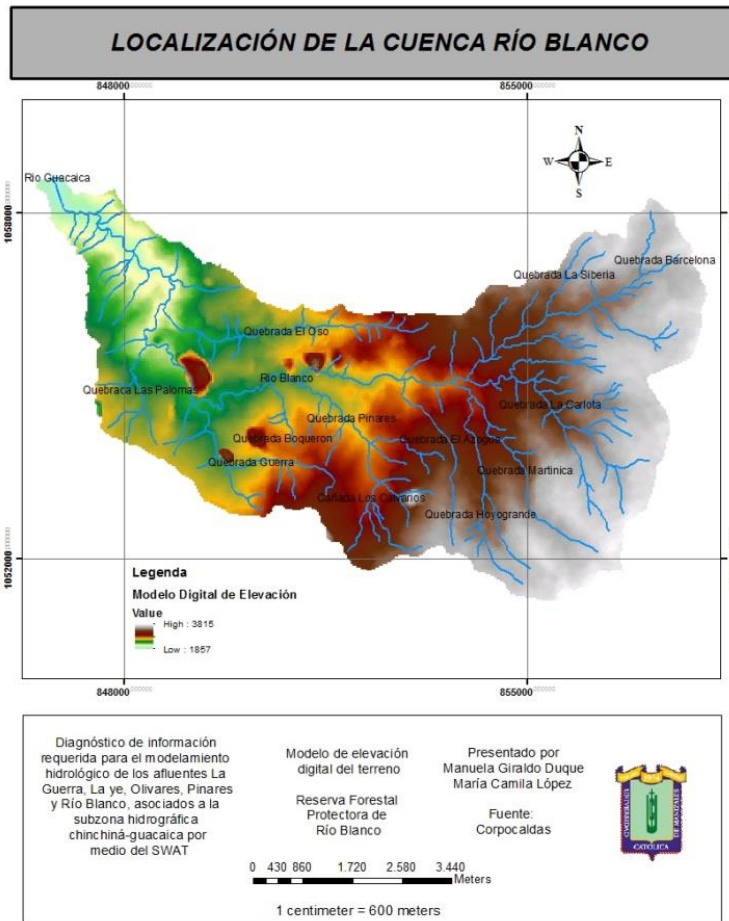


Figura 1. Localización de la Cuenca Río Blanco. Fuente: (Corpocaldas, 2015).

## Componente abiótico

Hidrología: El cauce de la cuenca presenta una orientación oriente-occidente; sus características topográficas y alta pluviosidad originan un gran número de afluentes y quebradas (Corpocaldas, 2010). De esta manera, se muestra el orden del sistema hidrológico de la microcuenca, en la tabla 1.

Nombre Cuenca hidrográfica	Río Chinchiná
Nombre Subcuenca	Río Guacaica
Nombre Microcuenca	Río Blanco
Número de orden	4

Tabla 1. Orden de sistema hidrológico. Fuente: (Corpocaldas, 2010).

En la tabla 2 se observa la red de drenajes de la microcuenca de Río Blanco.

Cuenca	Microcuenca	Drenaje principal	Caudal base (L/s)	Altitud del nacimiento (m.s.n.m)	Área (ha)	Drenaje (N°)
Río Blanco	Quebrada Pinares	Quebrada La Liberia	350	3650	4900	1
		Quebrada Martinico				3
		Quebrada Hoyo Grande				2
		Quebrada Las Palomas				8
		Quebrada Boquerón				1
		Quebrada Calvarios	139	3400	313,142	4
	Quebrada La Guerra		23,8	2900	195,85	1

Tabla 2. Drenajes de la cuenca Río Blanco. Fuente: (Corpocaldas, 2010).

Los caudales de la microcuenca Río Blanco tienden a tener grandes variaciones en períodos cortos de tiempo, lo cual los hace susceptibles a los cambios de clima, pues la diferencia entre caudales máximos y mínimos es significativa al igual que la pérdida de caudal en épocas de sequía, como se observa en la tabla 3 (Corpocaldas, 2010). La microcuenca abastece de agua potable un porcentaje de la población de Manizales, es por esto que el tener unos caudales tan variables y susceptibles a cambios, genera un riesgo en el abastecimiento de agua de la población.

Fuente	Caudal máx (L/s)	Caudal mín (L/s)	Caudal Promedio (L/s)	Pérdida de caudal (20 días de sequía)
Blanco	1017,2	219	408,1	43%
Pinares	407	73	172,2	21%
Olivares	169,2	32	89,3	36%
La Ye	437,6	55	167,5	25%
La Guerra	73,1	6,3	23,8	

Tabla 3. Caudales cuenca Río Blanco. Fuente: (Corpocaldas, 2010).

Climatología: La microcuenca se encuentra entre 1857 m.s.n.m y 3815 m.s.n.m, con temperaturas no mayores a 17°C con precipitaciones entre 1000 y 2000 m.m; Río Blanco se encuentra mayormente cubierta por bosques nativos y suelos de conservación; los bosques se caracterizan por sus estructuras complejas con árboles hasta de 30 metros

(Corpocaldas, 2010). La cuenca Río Blanco se encuentra bajo el régimen bimodal, lo que significa que tiene dos periodos de lluvias al año.

Geología: La zona de la cuenca de Río Blanco está conformada por flancos abruptos de los valles, donde afloran materiales del sustrato y los suelos son de carácter lítico y las vertientes bajas, alturas inferiores a 2200 m.s.n.m. Los suelos que pertenecen a la reserva se encuentran en una zona con pendientes que van desde suaves, fuertes y muy fuertes con una gran variedad de inclinaciones (Corpocaldas, 2010).

Según el Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora de las Cuencas Hidrográficas de Río Blanco y Quebrada Olivares, generado por Corpocaldas en el año 2010, se identifican cinco unidades cartográficas: relieve moderadamente escarpado con pendientes entre 50% y 75%, relieve fuertemente inclinado con pendientes entre 12% y 25%, relieve fuertemente escarpado con pendientes entre 50% y 75% y tierras productivas.

### **Componente biótico**

La reserva se caracteriza por su gran riqueza florística y gran variedad de aves, siendo referente nacional de biodiversidad.

Flora: Se han registrado 18 409 especies y morfoespecies, distribuidas en 220 géneros y 97 familias de plantas vasculares, de las cuales, doce presentan alguna categoría de riesgo a la extinción, dos en estado crítico, cinco con categoría de vulnerables y tres en peligro (Corpocaldas, 2010).

Fauna: con respecto a aves, se tienen reportadas en total 344 especies, pertenecientes a 48 familias, sobresaliendo las siguientes: Tyrannidae, Thraupidae, Trochilidae y Furnariidae. Se reportan en total 41 especies de Mamíferos (Corpocaldas, 2010).

### **Componente socio-cultural**

Al interior de la reserva habitan 100 personas con una densidad poblacional de 0,48 hab/Km<sup>2</sup>, distribuida de la siguiente manera 55% habita en la Vereda el Desquite; el 36% en la Vereda las Palomas; el 5% en Buenavista y el 4% en el sector aledaño al barrio Minitas (Corpocaldas, 2010).

En términos generales la reserva se encuentra con suelos conservados; a pesar de esto, se practican dos actividades productivas características de la zona, las cuales son: el cultivo de papa y el pasto para la rotación de ganado que predomina en este sector (Corpocaldas, 2010).





# CAPÍTULO II. METODOLOGÍA



Universidad  
Católica  
de Manizales

## **2. METODOLOGIA**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **Materiales**

Los materiales que se emplearon en esta investigación fueron: El software ArcGIS en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la herramienta de modelamiento hidrológico SWAT y la herramienta Excel que permitió la consignación y manipulación de los datos requeridos en tablas.

#### **Tipo de investigación**

Esta investigación se ha caracterizado como exploratoria y descriptiva. La investigación exploratoria tiene como objetivo aumentar el grado de familiaridad con fenómenos relativamente desconocidos o poco aplicados en el contexto local que se realiza el estudio, obteniendo información sobre la probabilidad de llevar a cabo una investigación explicativa dentro del contexto del área de estudio en futuras propuestas (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 1991). El modelamiento hídrico por medio de la herramienta SWAT ha sido explorado y aplicado a través de los años; sin embargo, no cuenta con antecedentes conocidos aplicados a cuencas de la región de Caldas; así mismo, es un tema que no cuenta con antecedentes de investigación dentro de la Universidad Católica de Manizales, es por esto que se realiza una exploración en la información del manejo del software y sus requerimientos. Posterior a la exploración, se recopiló la información pertinente para ser analizada; esto le da el carácter de investigación descriptiva.

El proyecto se desarrolló en tres fases: revisión de los requerimientos para emplear el software SWAT, recopilación de la información secundaria y evaluación y análisis de la calidad de la información seleccionada.

## Métodos

Para llevar a cabo el presente trabajo de grado, fue necesario diseñar una metodología, la cual consiste en tres fases principales:

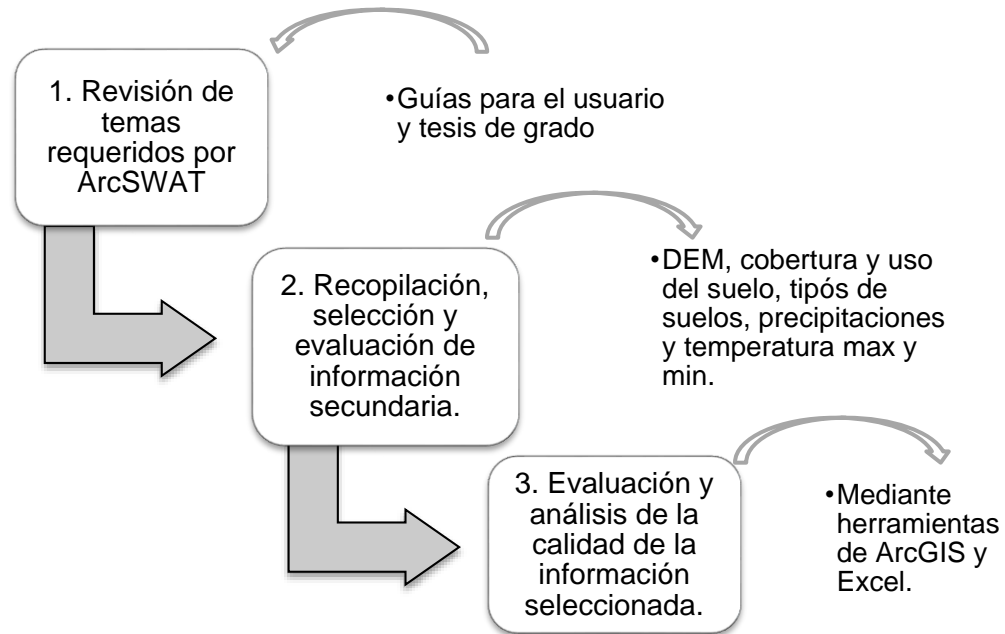


Figura 2. Resumen del procedimiento metodológico. Fuente: Autores.

### 2.1. Fase 1. Revisión de temas requeridos por ArcSWAT, necesarios para emplear el software en el modelamiento hidrológico de la microcuenca Río Blanco.

Se realizó inicialmente una búsqueda de información, por medio de portales académicos en sitios web, obteniendo así diversidad en documentos que principalmente comprendían tesis de grado para obtener títulos de maestrías, de igual manera se obtuvieron tutoriales y guías para el usuario SWAT. De acuerdo a lo anterior, se aclara que el tutorial, se obtuvo a partir de una búsqueda realizada en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales y a información facilitada por parte de Jeannette Zambrano Nájera (Profesora Asociada, PhD Ingeniería Civil). Este tutorial tiene como título “Tutorial San Pedro” o “Introduction to AGWA2 The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool”. Cabe resaltar que en la etapa de búsqueda se tuvieron en cuenta marcos de referencia publicados por institutos de investigación de gran relevancia tanto en el contexto nacional como internacional.



Seguidamente se efectuó el proceso de selección o inclusión de la información, teniendo en cuenta la búsqueda inicial de literatura gris, la cual conforma la fase de revisión de antecedentes que se debían tener en cuenta para comprender las funciones que puede desempeñar el software de acuerdo a las necesidades de estudio existentes. De esta manera, el principal criterio de selección de la información, se basó en que el documento incluyera los temas originales (no modificados) requeridos por SWAT, por esto se seleccionó el documento titulado: “*Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*” (Versión SWAT 2005), ejecutado por el CIAT.

Finalmente, fue recopilada la información secundaria necesaria, la cual comprende desde una descripción general del software hasta el funcionamiento del SWAT, mediante la fase terrestre y fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, logrando la documentación de los temas requeridos por ArcSWAT para su correcto funcionamiento.

## **2.2. Fase 2. Recopilación de información secundaria teniendo en cuenta las características climáticas, fisiográficas y geológicas del área de estudio.**

Durante esta fase se realizó la identificación de las instituciones locales, de las cuales se obtuvo la información secundaria requerida por el software. Los actores institucionales son: la Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas), Aguas de Manizales S.A E.S. P y el Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

En una siguiente etapa de la fase II se realizó la recopilación de la siguiente información:

- Climatológica: precipitaciones y temperatura periodo 2010-2016.
- Geológica: Mapa geológico, cobertura vegetal y uso de suelo y drenajes.
- Fisiográfica: Modelo de Elevación Digital (DEM), curvas de nivel y coordenadas de las estaciones pluviométricas y meteorológicas de la Cuenca Río Blanco.

Para apoyar el proceso de recopilación de la información se diseñó la tabla adjunta en el Anexo B, como instrumento de documentación.

Durante la etapa de la selección de la información espacial y temporal requerida por SWAT, se seleccionaron las estaciones pluviométricas y meteorológicas que generaron la temperatura y precipitación del período 2010-2016 y se realizaron los debidos cambios de sistema de coordenadas en las capas de drenajes, uso y cobertura de la tierra y en el DEM. Como método de selección se empleó la herramienta de ArcGIS generadora de polígonos de Thiessen, la cual permite la interpolación de los puntos de localización de las estaciones e identifica la cobertura de la estación en la cuenca. Posterior a esto se



generaron las bases de datos de temperatura y precipitación a escala diaria desde el año 2006 hasta el año 2016.

Con respecto a la información geográfica, se realizó la codificación requerida por el SWAT. Los mapas de geología y suelos se extrajeron de la información cartográfica del departamento de Caldas la cual fue obtenida por medio de la recopilación, “estado del arte” de la información suministrada a través de CORPOCALDAS. Para el mapa de cobertura vegetal se adiciono una columna con los atributos de uso del suelo, tal como se muestra en la tabla 4; estos códigos se obtuvieron de diferentes fuentes bibliográficas.

<b>Cobertura</b>	<b>Código SWAT</b>
Mosaico de pastos con espacios naturales	AGRL
Mosaicos de cultivos	
Afloramiento rocoso	
Tierras desnudas y degradadas	BARR
Zonas quemadas	
Bosque abierto	FRSE
Bosque de galería y ripario	
Bosque denso	
Bosque fragmentado	FRST
Bosque plantado	PINE
Pastos arbolados	PAST
Pastos en zonas inundables	
Pastos limpios	
Pastos enmalezados	RNGB
Herbazal	
Vegetación secundaria o en transición	
Aeropuerto	URBN
Red vial, vías y terrenos asociados	
Tejido urbano continuo	
Tejido urbano discontinuo	
Cuerpos de agua artificiales	WATR
Lagunas, lagos, y ciénagas naturales	
Ríos	
Zonas arenosas naturales	
Zonas pantanosas	WETL

Tabla 4. Clasificación de uso y cobertura en SWAT. Fuente: (Pajarito, 2017; Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, 2010).

Finalmente, para el mapa de tipo de suelo, se identificaron las características requeridas para la parametrización de suelos con respecto a los códigos que procesa el SWAT y mediante el “*Estudio General de Suelos, del departamento de Caldas*”, realizado por el IGAC, se extrajo información de gran relevancia para el diagnóstico.

### 2.3. Fase 3: Evaluación y análisis de la calidad de la información seleccionada empleando las diferentes herramientas que proporcionan ArcGIS y Excel.

Durante esta fase se realizó la evaluación correspondiente a la información fisiográfica (DEM y red de drenajes) y climatológica (precipitación y temperatura).

Inicialmente se llevó a cabo la corrección del modelo de elevación digital por medio de las herramientas de análisis espacial (*Spatial Analyst Tools*) que proporciona ArcGIS, las cuales se encargan de aplicar álgebra de mapas para la corrección de estos, mediante la ejecución de la calculadora ráster (*raster calculator*). Ubicada en:

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster calculator*

Se aplicó una fórmula con la cual se logren invertir los valores del DEM. Así:

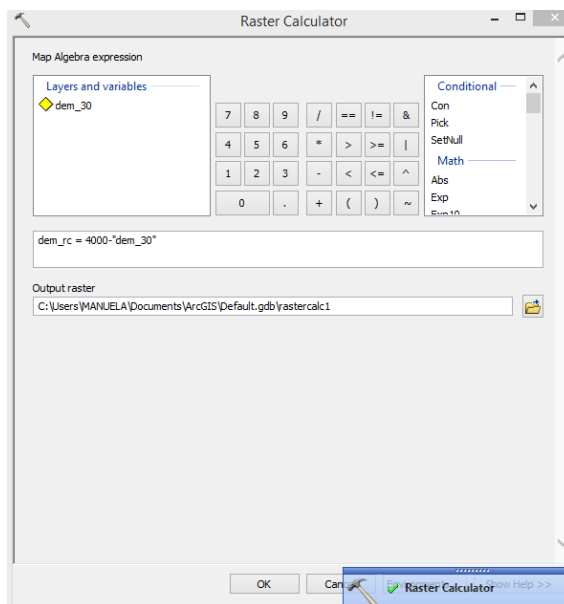


Figura 3. Operación en la calculadora ráster. Fuente: Autores.

En la ventana se ingresó  $dem_{rc} = 4000 - "dem_{30}"$ , esta ecuación es empleada para invertir el modelo, el valor 4000 se empleó, ya que es un dato mayor a la altura máxima del DEM utilizado.

Después, se aplicó la función *Fill* para llenar los sumideros (con el DEM invertido). Esta herramienta se encuentra ubicada en:

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill*

Se seleccionó como entrada el DEM invertido, con la finalidad de corregir los errores (llenado de sumideros).

Finalmente, se invirtió el DEM, con la calculadora ráster, ingresando la siguiente formula:  $DEM_{final} = 4000 - "Fill\_rasterc1"$ , como se observa en la ventana:

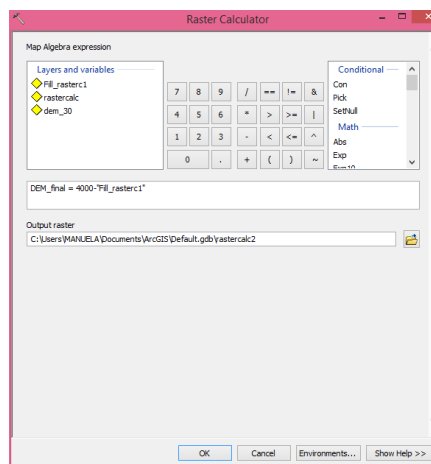


Figura 4. Demostración de “raster calculator” final. Fuente: Autores.

Una vez corregido el DEM, se llevó a cabo la evaluación de la calidad del shapefile recopilado sobre la red de drenajes de la microcuenca Río Blanco.

Se realizaron diferentes procedimientos mediante el software ArcGIS. “Una de las claves de la derivación de características hidrológicas de una superficie es la capacidad de determinar la dirección de flujo desde cada celda en el ráster” (Greenlee, 1987).

Primero se implementó la herramienta “*Flow Direction*” o Dirección de Flujo; tomando una superficie como entrada, en este caso el ráster del DEM corregido.

Se llevó a cabo la construcción de la red de drenaje. Se realizó la construcción del mapa de flujo por medio de la herramienta “*Flow Direction*” ubicada en:

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction*

En esta ventana se ingresó como entrada el ráster del modelo de elevación digital corregido, obteniendo así el mapa de direcciones de flujo.

Seguidamente se ejecutó la herramienta *“Flow Accumulation”*, mediante la cual se logra calcular para cada celda un valor de acumulación de peso, el cual proviene de las celdas que fluyen hacia esta.

Dando continuidad a lo ejecutado anteriormente, se construyó el mapa con la herramienta *“Flow Accumulation”* de ArcGIS, mediante la cual se obtuvo el volumen acumulado de todas las celdas a un punto específico. La herramienta que se encarga de obtener los flujos acumulados, se ubica en:

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation*

Se ingresó como entrada el ráster desarrollado anteriormente el *“Flow direction”* obteniendo la acumulación del flujo, para obtener la red de drenajes lo más clara posible, finalmente se cambió el método de clasificación por un intervalo geométrico para lograr visualizar la red de drenaje.

Con respecto a la información temporal, se realizó el análisis de la serie de datos de las estaciones pluviométricas por medio del análisis de doble masa, en el cual se elige una estación base para analizar las otras con respecto a esta.

Para evaluar y analizar la calidad de la información climática seleccionada de la zona de estudio, inicialmente se realizó una gráfica, la cual se encargará de ejemplificar los faltantes de información, con la finalidad de observar y analizar las consecuencias que traerá la carencia de esta información en el desarrollo de un futuro modelamiento. Posteriormente se realizó una gráfica, la cual representará el promedio de temperatura obtenido de la estación *“Mirador”* para la microcuenca Río Blanco, con la finalidad de caracterizar esta; posteriormente, se llevó a cabo la elaboración de climogramas anuales comprendiendo estos el período de análisis (2006-2015); con la finalidad de corroborar la información obtenida. Finalmente se propusieron métodos de estimación para completar series de datos climatológicos y algunas validaciones para estos.



# CAPÍTULO III. RESULTADOS.



Universidad  
Católica  
de Manizales





### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Fase I: Revisión de requerimientos de ArcSWAT.

##### 3.1.1. Descripción General del SWAT

Para realizar la simulación, la cuenca es dividida en un número de sub-cuencas, con el objetivo de identificar las múltiples áreas de la cuenca que tienen diferentes características de cobertura y usos de suelo, que como consecuencia puedan alterar la oferta hídrica.

La simulación hidrológica puede ser separada en dos divisiones, la primera es la Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico y la segunda es la Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico (Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, 2010), las cuales se desarrollan a continuación.

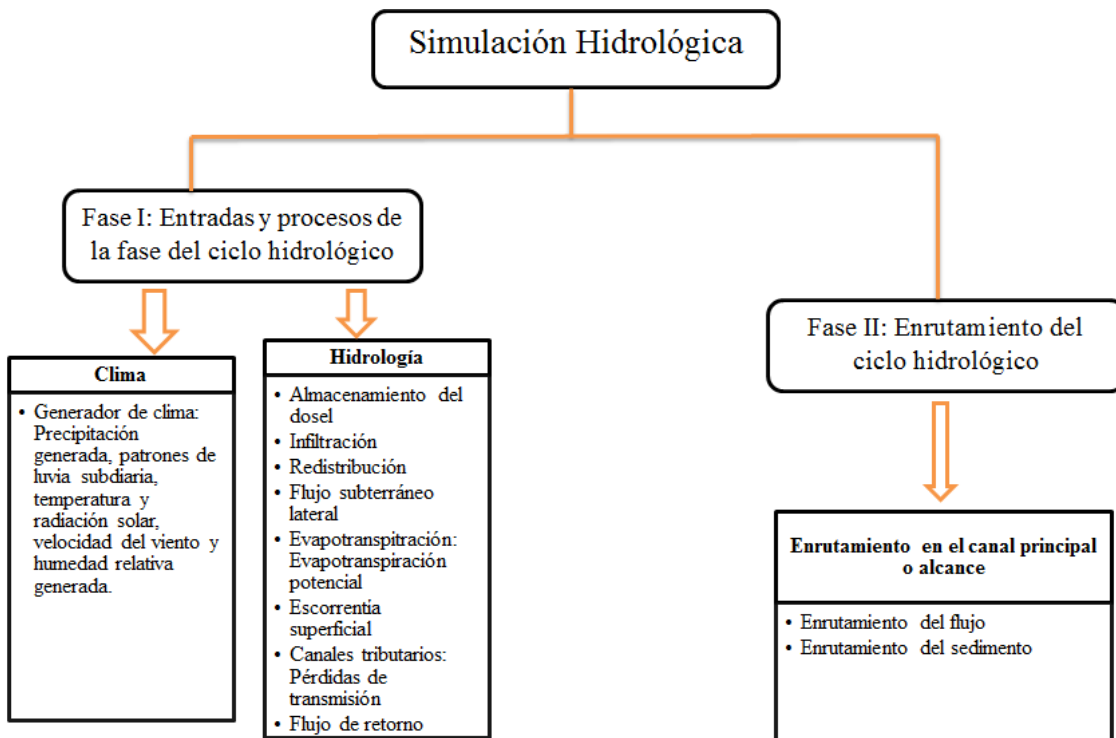


Figura 5. Simulación hidrológica. Fuente: Autores.

### 3.1.2. Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico

En esta fase se controla la cantidad de agua, sedimentos, alimento nutritivo y pesticida del canal principal en cada sub-cuenca (CIAT, 2010). El ciclo hidrológico simulado por SWAT basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

*Ecuación 1. Balance del ciclo hidrológico.*

$SW_t$ = Contenido final de agua en el suelo (mm H<sub>2</sub>O)

$SW_0$ = Contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H<sub>2</sub>O)

t= Tiempo (días)

$R_{day}$ = Cantidad de precipitación en un día i (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{surf}$ = Cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm H<sub>2</sub>O)

$E_a$ = Cantidad de evapotranspiración en día i (Mm H<sub>2</sub>O)

$W_{seep}$ = Cantidad de agua que se percola en el perfil del suelo en un día i (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{gw}$ = Cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H<sub>2</sub>O)

“La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para la cuenca. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua” (CIAT, 2010, p.8). Las principales entradas y procesos implicados en esta fase son los siguientes:

- Clima

Las características climáticas de la cuenca proporciona entradas de humedad y energía, el software requiere información sobre temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento para realizar el modelamiento de la cuenca; estas series de tiempo pueden ser ingresadas por registros observados o generados durante la simulación (CIAT, 2010). El generador climático, obtiene datos diarios basado en estadísticas como promedios o desviación estándar calculadas a partir de series de tiempo. Con respecto a la precipitación generada, SWAT emplea un modelo desarrollado por el Dr. A. D. Nicks en el año 1974, para generar la simulación de las precipitaciones diarias que no fueron identificadas por el software o llenar los vacíos de datos faltantes en los registros, asimismo, otro modelo es empleado para definir las probabilidades de un día húmedo o seco y en caso de necesitar los valores sub-diarios de lluvia, se emplea

una función exponencial para representar los valores de intensidad dentro de una tormenta. Los máximos y mínimos de temperatura y radiación solar son generados por una distribución normal de datos y una ecuación de continuidad es integrada en el generador, para justificar las variaciones de estos, con respecto a días húmedos o secos (CIAT, 2005). Una ecuación exponencial modificada es empleada para generar una medida de viento diario y el modelo de humedad relativa emplea una distribución triangular para calcular la humedad relativa, media y diaria del promedio mensual (CIAT, 2005).

- Hidrología

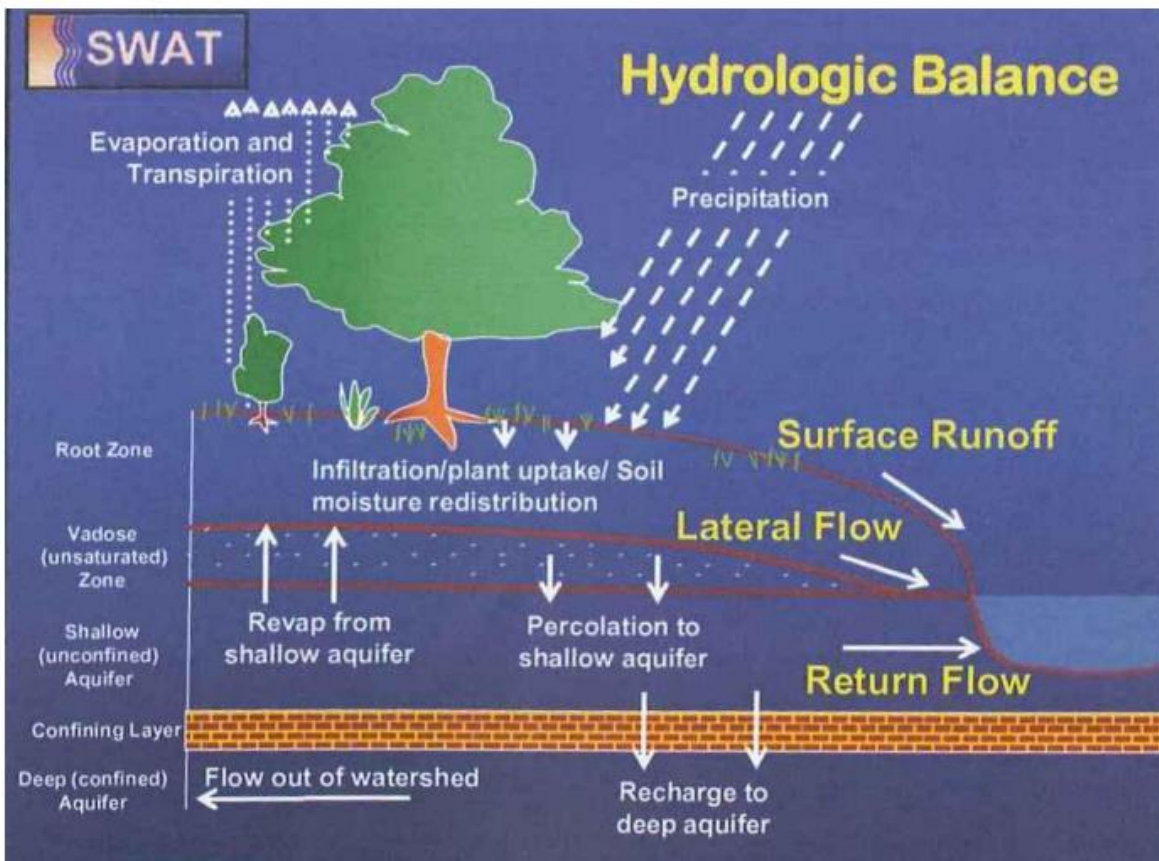


Figura 6. Representación del balance hídrico.  
Fuente: (CIAT, 2005).

La precipitación puede ser retenida en el dosel de los árboles, o puede caer a la superficie del suelo e infiltrarse en un perfil o seguir su rumbo como escorrentía. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirarse posteriormente (CIAT, 2005).

El agua almacenada en el dosel de los árboles, posteriormente se hace disponible para la evaporación; el software permite ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en el dosel del árbol, en el índice del área de la hoja para la cobertura de



tierra. “Este valor y el índice del área de la hoja son utilizados por el modelo para computar el almacenamiento máximo en el tiempo en el ciclo de desarrollo de la cobertura de tierra” (CIAT, 2005, p.11).

Con respecto a la infiltración, su tasa inicial depende del contenido de humedad en la tierra antes de la introducción del agua en la superficie terrestre y su tasa final equivale a la conductividad hidráulica saturada de la tierra (CIAT, 2010), “La cantidad de agua que entra al perfil de suelo es calculada por medio de la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía superficial, el método de infiltración modela esta, sin embargo, requiere los datos de precipitación en rangos de tiempo menores” (CIAT, 2005, p.11)

La redistribución se da cuando el agua comienza a moverse de manera continua por el perfil de suelo causada por diferencias en el contenido de agua en el perfil, una vez el contenido del agua en el perfil es uniforme, la redistribución cesará; SWAT emplea un almacenamiento que predice el flujo por cada capa de suelo en la zona principal de la cuenca; la redistribución es afectada por la temperatura del suelo, si la temperatura de alguna capa es  $\leq 0^{\circ}\text{C}$  no se dará ninguna redistribución (CIAT, 2010). El flujo subterráneo lateral, es la contribución de la corriente originada debajo de la superficie pero por encima de las piedras saturadas con agua; este se calcula simultáneamente con la redistribución, el software predice el flujo lateral en cada capa de suelo (CIAT, 2005).

Para cada Unidad de Respuesta Hidrológica-URH y utilizando las cantidades diarias de precipitación, SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos de escorrentías; la escorrentía superficial es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada (CIAT, 2005). El volumen de escorrentía superficial puede ser computado usando la modificación de dos métodos, el de curva numérica del Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos, en el cual la curva varía no linealmente con respecto al contenido de humedad del suelo; por otro lado, el método de Gree & Ampt que requiere los datos sub-diarios de precipitación y calcula la infiltración (CIAT, 2005).

Las predicciones de tasa de escorrentía máxima son calculadas por una modificación del método racional, este se basa en que si una lluvia intensa ( $i$ ) comienza instantáneamente y continúa de manera indefinida, la escorrentía superficial incrementará hasta el tiempo de concentración ( $t_c$ ), cuando toda la microcuenca contribuye al flujo de salida; en la modificación de la formula, la tasa de escorrentía máxima está en función de la proporción diaria de la precipitación que cae durante la microcuenca ( $t_c$ ), el volumen diario de escorrentía superficial y el tiempo de concentración de la microcuenca (CIAT, 2005).

SWAT modela la evapotranspiración para suelos y plantas por separado; la evaporación del agua contenida en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad del suelo y su contenido de agua y la transpiración de las plantas se simula con una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice del área de la hoja (CIAT, 2005). “La evapotranspiración potencial es la proporción en la cual la evapotranspiración ocurriría en una gran área cubierta uniformemente y completamente con vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre” (CIAT, 2010, p.12)

Existen dos tipos de canales que están definidos dentro de una microcuenca: el canal principal y los canales tributarios, los cuales son de menor orden que el canal principal; cada canal tributario dentro de una cuenca drena solo una porción de la microcuenca y no recibe contribución de agua subterránea; SWAT usa los atributos de canales tributarios para determinar el tiempo de concentración para la microcuenca (CIAT, 2005). Las pérdidas de flujo superficial a través de la lixiviación por el cauce ocurre en corrientes intermitentes, donde la contribución de agua subterránea solo ocurre en cierto tiempo del año (CIAT, 2010). SWAT emplea el método de Lane para estimar la transmisión de pérdidas cuando se dispone de datos observados, este método emplea una ecuación de derivación desarrollada para cuencas del suroeste de los Estados Unidos, caracterizadas como semiáridas con canales que albergan grandes cantidades de flujo (Natural Resources Conservation Services, 2007).

“El flujo de retorno, es el volumen de agua subterránea originado en el nivel freático; SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos, uno superficial libre, que contribuye al retorno de las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica; y un acuífero profundo limitado que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca” (CIAT, 2010, p.14). Además de retornar el flujo, el agua almacenada en el acuífero superficial puede abastecer de nuevo humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o es absorbido directamente por la planta (CIAT, 2010).

### **3.1.3. Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico**

Una vez que SWAT determina las cargas de agua y sedimento hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenta usando una estructura de orden. “Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce” (CIAT, 2010, p.19).

La siguiente figura ilustra los diferentes procesos en corriente modelados por SWAT.

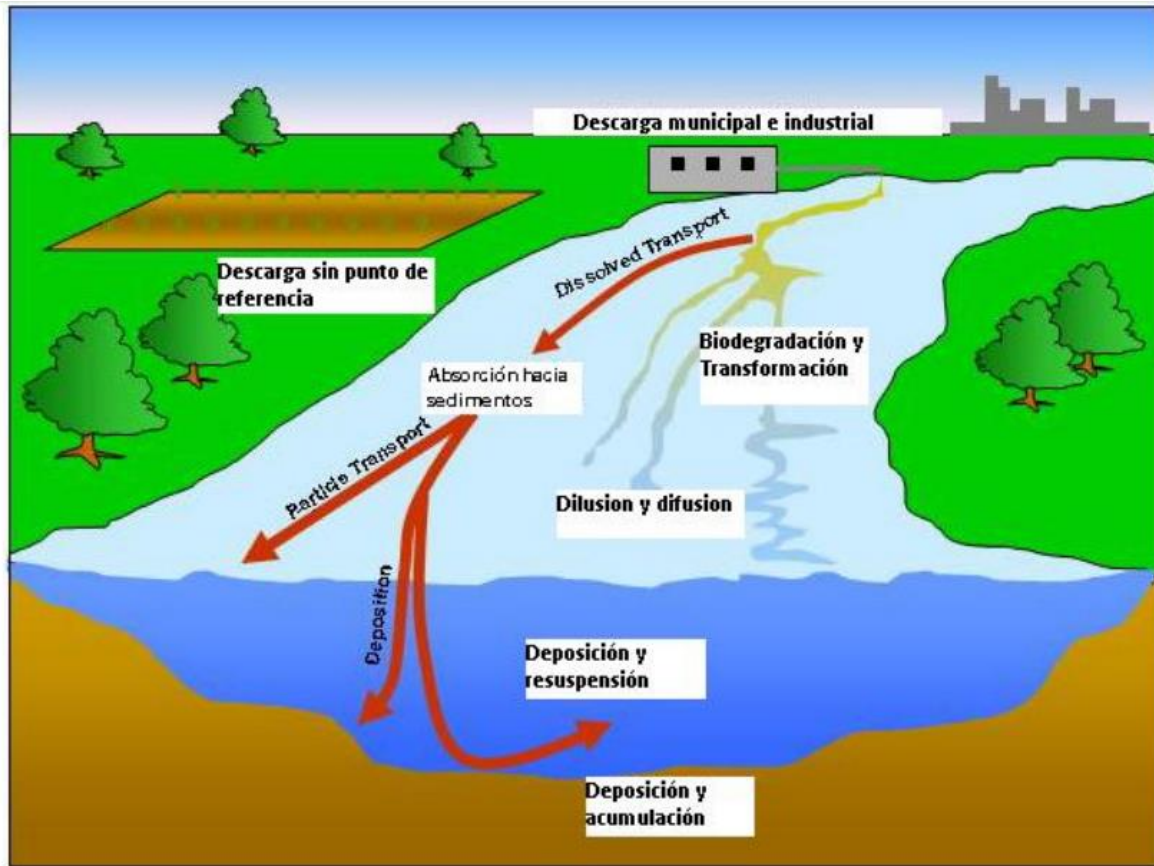


Figura 7. Procesos de corriente modelados por SWAT.  
Fuente: (CIAT, 2010)

### Enrutamiento en el canal principal o alcance

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en los siguientes componentes:

- Enrutamiento de flujo

“Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado de agua de descargas del punto de la fuente. El flujo es dirigido por el canal que utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de enrutamiento de Muskingum”. (CIAT, 2010, p.20)

- Enrutamiento del sedimento

“El transporte del sedimento hacia el canal es controlado por la operación simultánea de dos procesos, deposición y degradación”. (CIAT, 2010, p.20) Existen versiones anteriores de SWAT, en las cuales emplearon la fuerza de la corriente para estimar la

deposición/degradación en los canales, siendo esta, el producto de la densidad de agua proporcionada del flujo y la pendiente de la superficie del agua.

### 3.1.4. Datos de entrada del modelo SWAT

“La extensión ArcSWAT ArcGIS, es la extensión gráfica de usuario para el modelo SWAT2005, este es un paquete de análisis de datos geográficos diseñado para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante a partir de simulaciones usando las características principales de ArcGIS”. (CIAT, 2010, p.21)

Para preparar los datos de entrada, empleando la interface, se debe acceder a los temas de cada mapa en ArcGIS y los archivos de base de datos, los cuales proveen información de diferentes tipos dentro de la cuenca. Los mapas necesarios y los archivos de base de datos deben estar listos para correr la interface (CIAT, 2010).

A continuación, se mostrarán los diferentes temas requeridos por ArcSWAT:

REQUERIMIENTOS ARCSWAT	DESCRIPCIÓN
GRID – Modelo Digital de Elevación (DEM)	<p><u>La resolución del mapa</u> debe ser definida en una de las siguientes unidades: metros, kilómetros, pies, yardas, millas, grados decimales.</p> <p><u>La elevación</u> debe ser definida en una de las siguientes unidades: metros, centímetros, yardas, pies, pulgadas.</p> <p>En caso de no contar con un DEM, se deben tener las curvas de nivel, con su respectiva altura en las unidades mencionadas anteriormente.</p>
GRID – Cobertura y Uso de la tierra	<p>Las categorías para el mapa de uso y cobertura de la tierra, necesita ser reclasificada dentro de los tipos que el SWAT maneja, es decir que:</p> <p>Se pueden digitar las cuatro letras del código interno del SWAT para cada categoría, cuando el mapa es cargado en la interface, o es posible crear una tabla que identifique las cuatro letras del código SWAT para las diferentes categorías de Uso y cobertura de la tierra en el mapa.</p>

REQUERIMIENTOS ARCSWAT	DESCRIPCIÓN
GRID – Suelos*	<p>Las categorías del mapa de suelos, deben ser asociadas a la base de datos de suelos (la interface solo incluye datos de suelos de los Estados Unidos), por esta razón en la guía para usuarios SWAT, se recomienda la opción “Name”, para asociar el mapa a la base de datos de suelos de la interface.</p> <p>Se deberán importar los archivos (.sol) o el tipo de datos de suelos a través de la base de datos para cada una de las categorías, la variable “Name” debe existir en estas, para lograr reclasificar las categorías del mapa.</p>

Tabla 5. Requerimientos ArcSWAT. Fuente: (CIAT, 2010).

\*De acuerdo al GRID requerido de suelos, es necesario contar con la descripción físico química de las unidades del suelo, siendo indispensable obtener la información de 19 parámetros para lograr la modelación hidrológica respectiva, estos parámetros son: Unidad cartográfica, taxonomía, porcentaje de cada taxonomía al interior de cada unidad cartográfica, perfil, horizonte, % de arena, % de arcilla, % de limo, textura, pH, %carbono, % de materia orgánica, grupo hidrológico, densidad aparente del suelo, capacidad de agua disponible, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, albedo del suelo y USLE (Universal Soil Loss Equation).

El SWAT requiere una parametrización específica de suelos, el software es compatible con los siguientes tipos de clasificaciones de datos digitales de suelos de los Estados Unidos: SSURGO, STATSGO, entre otros. Estos datos cartográficos están compuestos por códigos que representan unidades extraídas de porcentajes de arena, limo y arcilla (densidad aparente de textura).

- Encuesta del suelo geográfico de los Estados Unidos (SSURGO), contiene información recolectada por la Cooperativa Nacional de Estudio de Suelos y está disponible para la mayoría del territorio de los Estados Unidos. La información se recolectó por medio de observación y las muestras fueron analizadas en laboratorios. Las unidades del mapa describen los suelos y otros componentes, los cuales tienen propiedades únicas, interpretaciones y productividad; cada unidad del mapa contiene de uno a tres componentes mayores y algunos componentes menores y son codificadas con respecto a los componentes mayores. La información disponible para esta clasificación contiene capacidad de agua, reacción del suelo, conductividad eléctrica, frecuencia de inundación y

fertilidad (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2017). Esta parametrización incluye la profundidad del perfil de suelo, en específico la profundidad de cada horizonte en centímetros (cm) para cada uno de los componentes (Figura 9).

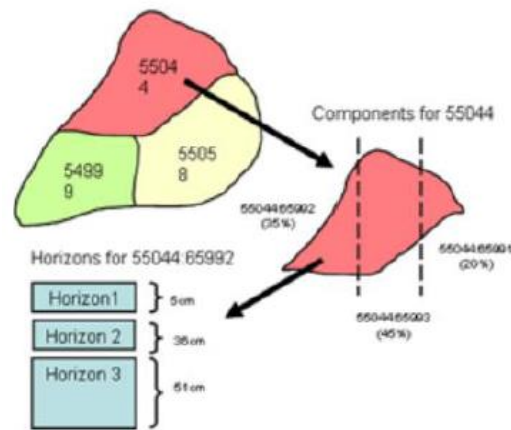


Figura 8. Parametrización de suelos según la SSURGO. Fuente: (Zambrano, 2016).

- Geografía del Suelo Estatal de los Estados Unidos (STATSGO), es un amplio inventario de suelos con áreas que presentan características similares o patrones repetitivos; el mapa general de suelos de los Estados Unidos está comprendido en unidades de asociación general del suelo. La base de datos fue creada generalizando los detalles del estudio geográfico del suelo; la composición de las unidades se determinó mediante áreas de muestreo en los mapas más detallados y luego se expandieron estadísticamente los datos para caracterizar la unidad completa. Los datos tabulados contienen estimados de propiedades físicas, químicas e interpretaciones de suelo (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2017). Esta parametrización incluye la profundidad de las capas del suelo en pulgadas (") para cada uno de los tres componentes (Figura 10).

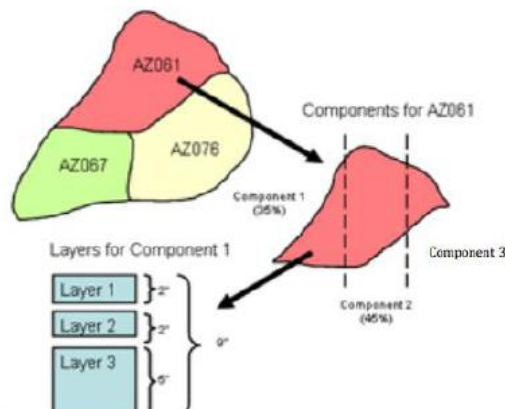


Figura 9. Parametrización de suelos según STATSGO. Fuente: (Zambrano, 2016).

ARCHIVOS DE TEXTO Y TABLAS EN ARCGIS	DESCRIPCIÓN
Tabla de localización	<p>La tabla de localización es empleada para especificar la ubicación de: localizaciones de puntos para la recolección de información de lluvia, clima, temperatura, o localización de estaciones meteorológicas.</p> <p>Los datos meteorológicos de la región diferente a U.S, deberán ser introducidos a través de la interface en la base de datos de estaciones meteorológicas cuando se crea el proyecto.</p>

Tabla 6. Archivos de texto y tablas en ArcGIS, tabla de localización. Fuente: (CIAT, 2010).

En el Anexo C, se encuentra el formato de tabla de localización requerido.

ARCHIVOS DE TEXTO Y TABLAS EN ARCGIS	DESCRIPCIÓN
Atributos de Uso del Suelo (.dbf)	<p>“La tabla de atributo de uso de la tierra es utilizada para especificar el código del tipo de uso/planta o tipo de uso urbano para ser modelado para cada categoría en el mapa ráster de Uso de la tierra” (CIAT, 2010, p.25).</p>

Tabla 7. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, tabla de atributos de uso del suelo. Fuente: (CIAT, 2010).

En el Anexo D, se presenta la tabla recomendada por el Manual SWAT, versión 2005 (2 campos).

ARCHIVOS DE TEXTO Y TABLAS EN ARCGIS	DESCRIPCIÓN
Atributos de Suelo (.dbf)	<p>En el archivo de atributos de suelos se especifica “el tipo de suelo a ser modelado por cada categoría en el mapa ráster de suelos. El formato del archivo cambiará dependiendo sobre la opción que se escoja para enlazar los datos de suelos al mapa. La primera fila de la tabla debe contener los nombres de los campos o</p>

	atributos. Las filas siguientes tendrán los datos requeridos” (CIAT, 2010, p.26).
--	---

Tabla 8. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, atributos de suelo. Fuente: (CIAT, 2010).

En el Anexo E, se encuentra el formato de tabla para atributos de suelo.

ARCHIVOS DE TEXTO Y TABLAS EN ARCGIS	DESCRIPCIÓN
Datos de precipitación (.dbf)	La tabla de datos de precipitación es empleada para guardar la precipitación diaria de una estación meteorológica.

Tabla 9. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, datos de precipitación. Fuente: (CIAT, 2010)

El formato de tabla de datos de precipitación (2 campos), se encuentra en el Anexo F.

ARCHIVOS DE TEXTO Y TABLAS EN ARCGIS	DESCRIPCIÓN
Datos de Temperatura (.dbf)	“La tabla de temperatura es utilizada para almacenar las temperaturas máximas y mínimas registrada por un estación meteorológica” (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)

Tabla 10. Archivos de Texto y tablas en ArcGIS, datos de temperatura. Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)

El formato de tabla de datos de precipitación (3 campos), se encuentra en el Anexo G.

### 3.1.5. Datos de salida del modelo SWAT

El modelo hidrológico SWAT, genera una serie de archivos de salida en los cual se generan resultados fundamentales para el análisis de la cuenca; dentro de estos resultados se encuentra la delimitación de la cuenca con su respectiva división en microcuencas, las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), que son las unidades en las que se dividen las microcuencas que poseen características geo climáticas similares, formando así zonas homogéneas; y una ilustración con el ciclo hidrológico como resultado del balance hídrico de la zona de estudio (Barbudo et al., 2016). Durante la simulación hidrológica, el SWAT arroja la precipitación total para cada microcuenca en el período simulado, evapotranspiración estimada, percolación y escorrentía superficial para cada microcuenca y la producción estimada de sedimentos; todo esto, información fundamental para el análisis integral de la cuenca.



INFORMACIÓN	UNIDADES
Microcuencas	Km <sup>2</sup>
Unidades de Respuesta Hidrológica	# de URH
Tipo de cobertura	
Caudales	m <sup>3</sup> /día
Precipitaciones	mm
Evapotranspiración	mm
Percolación	mm
Escorrentía superficial	mm
Producción de sedimentos	Ton/Ha

Tabla 11. Salidas del SWAT. Fuente: (CIAT, 2010).

### 3.2. Fase II: Recopilación de información secundaria del área de estudio.

Teniendo en cuenta la información disponible y los requerimientos del software, se realizaron los ajustes necesarios para la preparación de la información como entrada del SWAT. Para llevar a cabo el diagnóstico de la información requerida para el modelamiento hidrológico del área de estudio, se recolectó y estructuró la siguiente información básica, tabla 12:

INFORMACIÓN	TIPO DE INFORMACIÓN	FUENTE	FORMATO
Modelo de Elevación Digital (DEM)	Fisiográfica	Corpocaldas	Raster
Drenajes de la cuenca	Geológica	Corpocaldas	Vectorial
Mapa geológico	Geológica	Corpocaldas	Vectorial
Cobertura y uso de la tierra	Geológica	Corpocaldas	Vectorial
Localización de estaciones meteorológicas y pluviométricas	Geográfica	Aguas de Manizales S.A E.S.P - IDEA	Excel
Temperatura (2010-2015)	Climatológica	Aguas de Manizales S.A E.S.P	Excel
Precipitaciones (2010-2016)	Climatológica	Aguas de Manizales S.A E.S.P	Excel

Tabla 12. Información espacial y temporal. Fuente: Autores.

### 3.2.1. Información espacial

La información espacial recopilada (DEM, red de drenajes, mapa geológico y mapa de cobertura y uso de la tierra) se encontraba en unas coordenadas geográficas diferentes a las establecidas por el IGAC-Instituto Geográfico Agustín Codazzi a nivel nacional, por lo tanto, se realizó la transformación de coordenadas, sus coordenadas de origen se encontraban en el sistema Bogota\_Transverse\_Mercator. Se realizó el procedimiento por medio de la herramienta *Project* de Proyecciones y Transformaciones, transformando el sistema de coordenadas a MAGNA SIRGAS- Colombia Bogotá Zone.

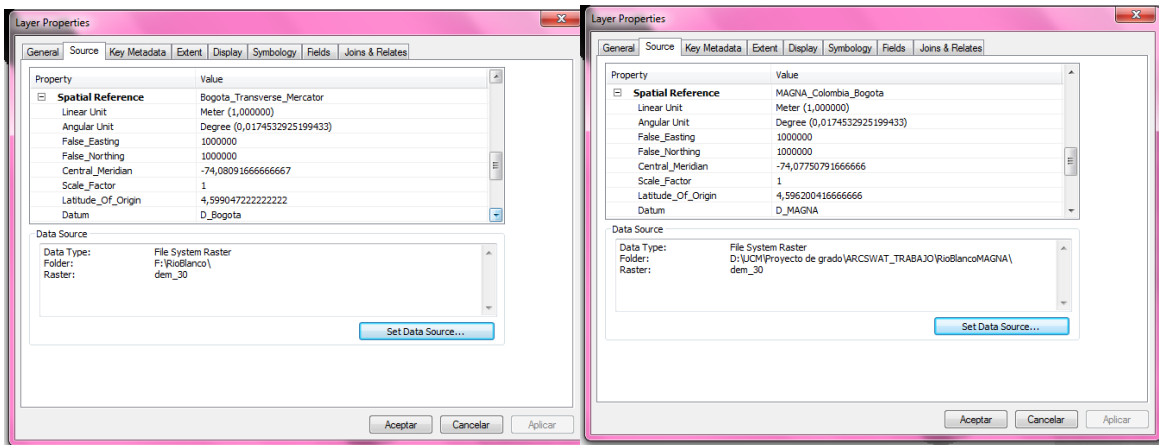


Figura 10. Transformación del sistema de coordenadas del DEM. Fuente: Autores.

- Modelo Digital de Elevación (DEM): El modelo de elevación digital empleado, fue obtenido mediante una solicitud de información, realizada a la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS), sobre la reserva forestal protectora de río blanco, logrando adquirir así un DEM de tipo 30x30m de resolución elaborado por la NASA. La microcuenca de Río Blanco, presenta una variedad altitudinal entre los 3.815 y 1.857 msnm, como se observa en la Figura 12:

## MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL- CUENCA RÍO BLANCO

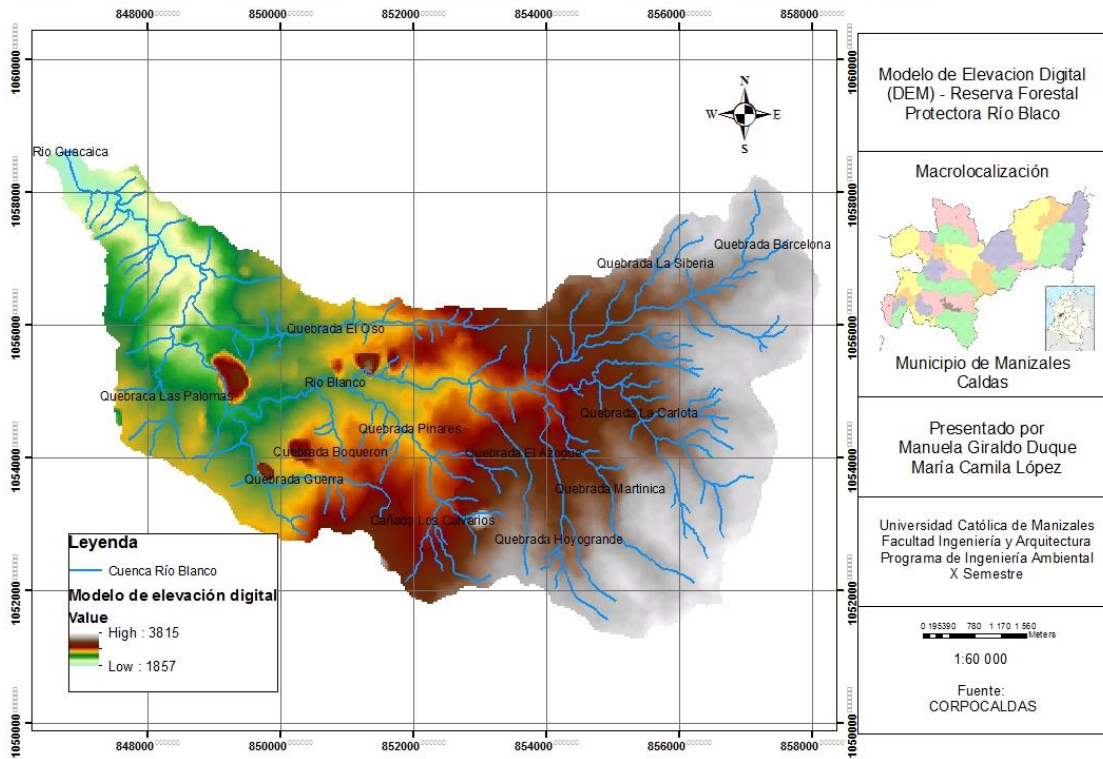


Figura 11. Modelo de elevación digital (DEM) – Reserva forestal protectora Río Blanco. Fuente: (CORPOCALDAS, 2016)

### ○ Cobertura y uso de la Tierra:

La Microcuenca Río Blanco se compone por dos clases de cobertura, bosques y áreas seminaturales y territorios agrícolas, las cuales se subdividen en ocho tipos de cobertura vegetal, como se observa en la tabla 13:

Cobertura	Área (Ha)
Bosque de galería y ripario	15,56
Bosque denso alto de tierra firme	1247,22
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	746,73
Mosaico de pastos con espacios naturales	551,87
Pastos enmalezados	440,27
Pastos limpios	1143,86
Plantación de coníferas	40,49
Vegetación secundaria o en transición	484,5

Cobertura	Área (Ha)
<b>Total</b>	4670,5

Tabla 13. Tipos de cobertura vegetal se la Microcuenca Río Blanco. Fuente: Autores.

De acuerdo al mapa obtenido de Corpocaldas, el tipo de suelo predominante en el área de la cuenca de Río Blanco corresponde a bosque denso alto de tierra firme con un 26,7% del área total de la cuenca, bosques y áreas seminaturales los cuales corresponde a la vegetación tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total de la unidad, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos (Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonia Colombiana-SIAT-AC, 2015), precedida por pastos limpios con un 24,49% ,los cuales son territorios agrícolas en los que predominan pastizales dedicados a la producción ganadera, tal como se observa en la figura 13.

También hay existencia de bosques fragmentados con pastos y cultivos (15,99% del área total), los cuales se caracterizan por bosques naturales con intervención humana que mantienen su estructura original, áreas completamente transformadas en el interior de la cobertura, originando parches por la presencia de otras coberturas que sugieran un uso del suelo como pastos y cultivos que reemplazan la cobertura original, las cuales deben representar entre el 5% y el 30% del área de la unidad de bosque natural (Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonia Colombiana-SIAT-AC, 2015), los cultivos característicos en esta área son cultivos de papa. El área de la Microcuenca Río Blanco es en su mayoría bosque, esto es debido a que se encuentra dentro de la Reserva Forestal Protectora de las cuencas Hidrográficas de Río Blanco y Quebrada Olivares, zona protegida. Según el Plan de Manejo de la Reserva Río Blanco, En la reserva se establecieron Plantaciones Forestales con cuatro especies principalmente: Aliso, de la familia *Betulaceae*; Eucalipto (*Eucalyptus Sp.*) de la familia *Myrtaceae*; Pino patula (*Pinus patula*) de la familia *Pinaceae*, Ciprés (*Cupressus lusitánica*) de la familia *Cupresaceae*.

Cobertura	Área (Ha)	Porcentaje
Bosque de galería y ripario	15,56	0,33
Bosque denso alto de tierra firme	1247,22	26,70
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	746,73	15,99
Mosaico de pastos con espacios naturales	551,87	11,82

Cobertura	Área (Ha)	Porcentaje
Pastos enmalezados	440,27	9,43
Pastos limpios	1143,86	24,49
Plantación de coníferas	40,49	0,87
Vegetación secundaria o en transición	484,5	10,37
<b>Total</b>	<b>4670,5</b>	<b>100</b>

Tabla 14. Cobertura vegetal. Fuente: Autores

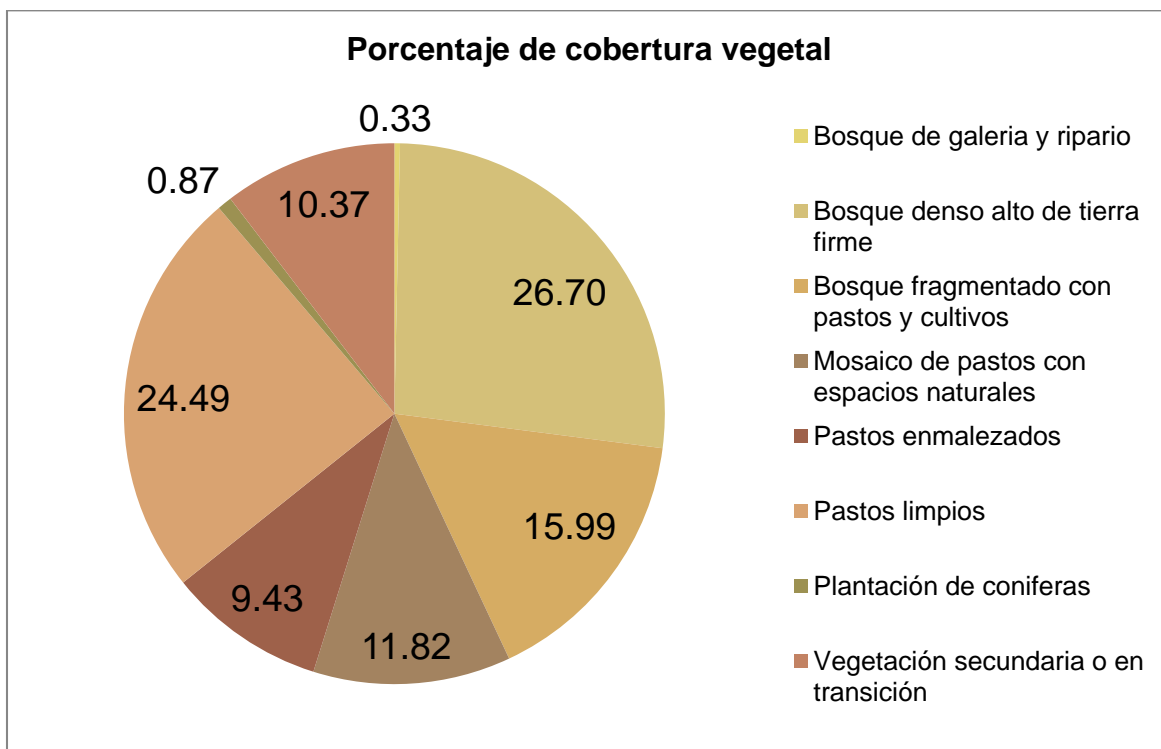


Figura 12. Porcentaje de uso y cobertura del suelo. Fuente: Autores

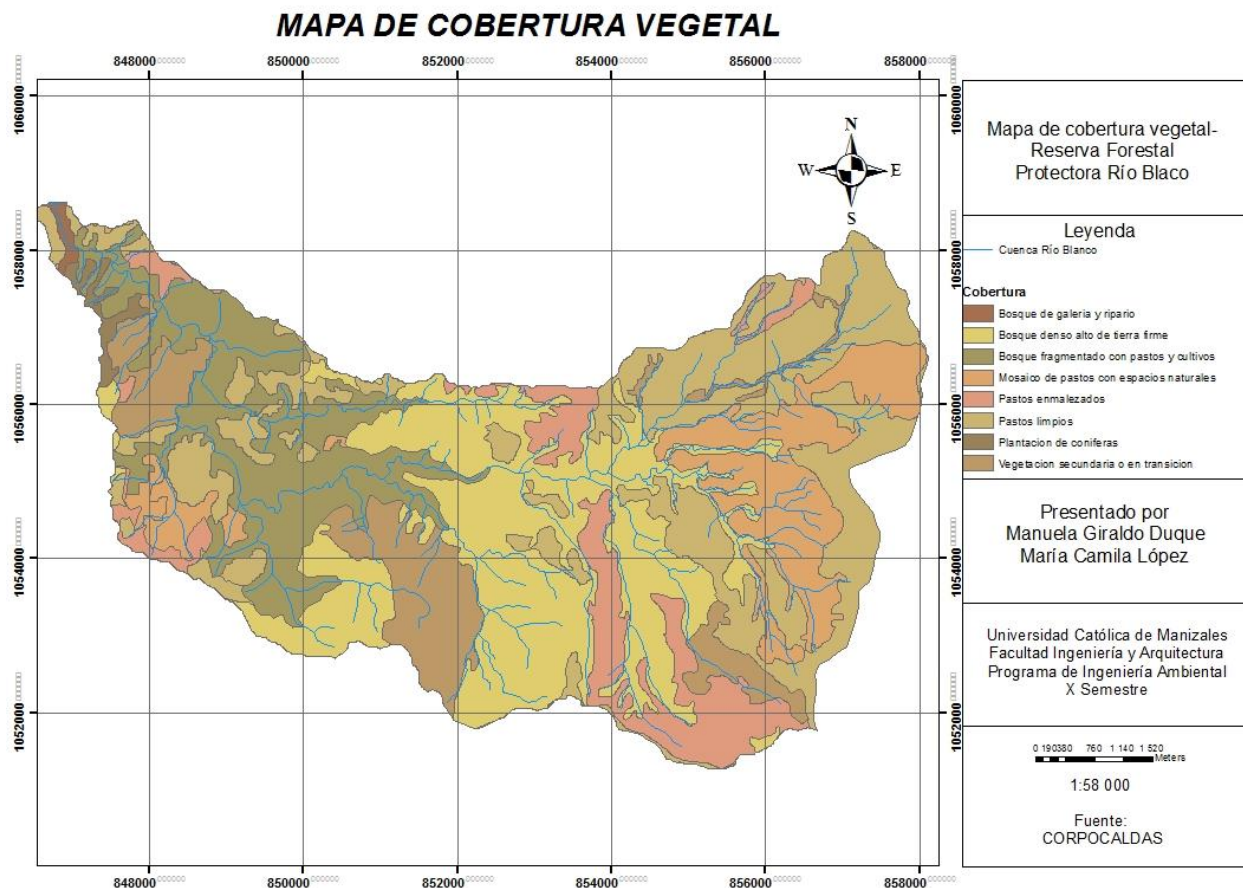


Figura 13. Uso y cobertura del suelo. Fuente: (Corpocaldas, 2016).

Para emplear el shape las coberturas clasificadas bajo el Corine Land Cover-CLC se debe reclasificar la tabla de atributos de este, con los códigos que requiere el SWAT, clasificando así los tipos de vegetación en cinco nuevas categorías, como se observa en la tabla 15:

<b>Cobertura</b>	<b>Código SWAT</b>
Plantación de coníferas	PINE
Pastos limpios	PAST
Bosque denso alto de tierra firme	FRST
Vegetación secundaria o en transición	RNGB
Mosaico de pastos con espacios naturales	AGRL

Tabla 15. Código SWAT para cobertura vegetal. Fuente: (Pajarito, 2017)

Con respecto a los usos de suelo que se dan en el área de la Microcuenca Río Blanco, se pueden definir cuatro en total: Bosques, Pastos, Áreas agrícolas heterogéneas y Áreas de vegetación herbácea y/o arbustiva, según el mapa obtenido en Corpocaldas, Figura 15.

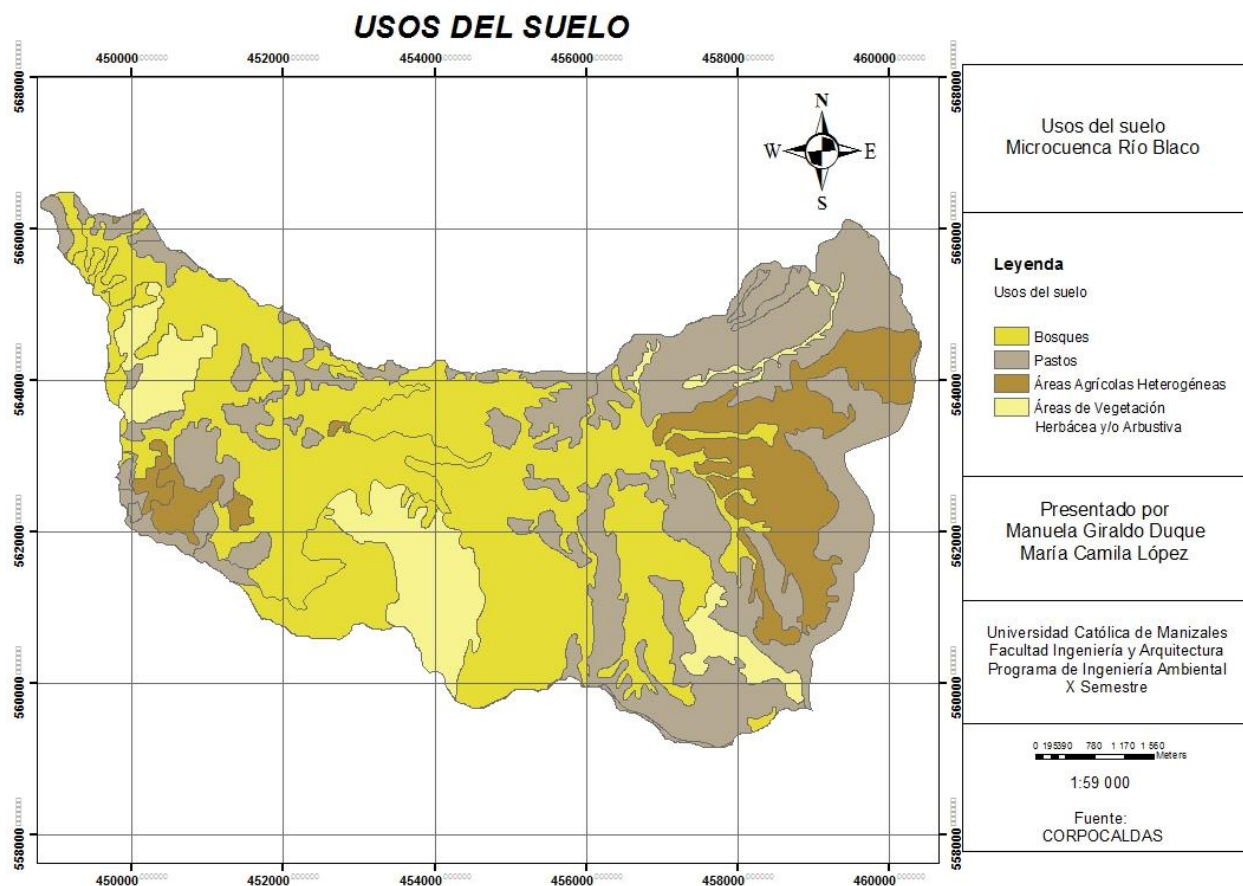


Figura 14. Mapa de usos del suelo. Fuente: (Corpocaldas, 2016)

El uso de suelo que mayor área tiene en la zona de estudio corresponde a bosques, pues cubre el 43,9% del área de la microcuenca, seguido por el de pastos con un 33,9% y las áreas de menor proporción son las agrícolas heterogéneas (11,8 %) y de vegetación herbácea y/o arbustiva (10,4) (tabla 16). La razón por la que existen 1584,14 Ha de pastos es porque en esta zona se genera en gran medida la producción ganadera., en la reserva se identificaron dos clases de sistemas productivos, el pasto para implementación de ganado con 1776 ha. (36%), y el de la rotación de pasto – papa con 80 ha. (1.6%) (Corpocaldas, 2010).

Según el Plan de Manejo de la Reserva forestal protectora de las cuencas hidrográficas de río blanco y quebrada olivares, esta zona se caracteriza por tener un mayor número de especies de las familias *Asteraceae*, *Solanaceae* y *Piperaceae* principalmente.



Uso de suelo	Área (Ha)	Porcentaje
Áreas agrícolas heterogéneas	551,87	11,8
Áreas de vegetación herbácea y/o arbustiva	484,5	10,4
Bosques	2050,01	43,9
Pastos	1584,14	33,9
<b>Total</b>	<b>4670,52</b>	<b>100,0</b>

Tabla 16. Usos del suelo. Fuente: Autores.

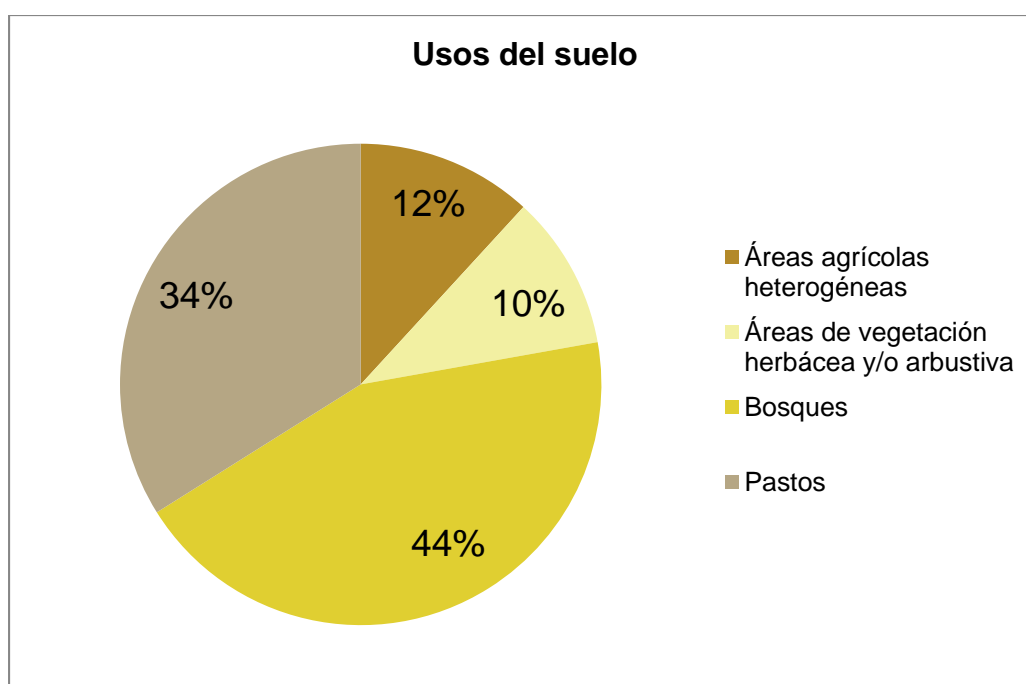


Figura 15. Porcentaje de usos de suelo. Fuente: Autores.

- Suelos: Al igual que la información mencionada anteriormente, el shapefile perteneciente a suelos, fue obtenido por medio de la información suministrada a través de CORPOCALDAS, la cual contiene información de las unidades cartográficas, compuestas por tipo, pendiente y erosión; material parental, características generales del suelo, clasificación de acuerdo a las características de los componentes taxonómicos, profundidad, pH, fertilidad, descripción del relieve, entre otras.

De acuerdo a los requerimientos del software, se editó la tabla de atributos de este shapefile, agregando una columna específica de texturas de suelos y su respectivo



código, los resultados de este proceso se encuentran en la tabla 20. Partiendo de la clasificación taxonómica americana del suelo (Soil Survey Staff, 1983), se generó la columna de texturas. Los suelos Lithic Troorthents se caracterizan por ser de textura franco arenosa, los suelos Umbric Vitrandept se caracterizan por ser arenosos y los suelos Hydric Dystrandept son de texturas francas a francoarcillosas.

En el marco de la anterior explicación, cabe precisar algunas propiedades físico-químicas de los suelos representativos, de acuerdo al Estudio General de Suelos del IGAC, teniendo en cuenta la clasificación taxonómica americana del mismo:

Nombre del suelo/ Clasificación	Horizonte	Profundidad cm	Granulometría % Bouyoucos			Textura	pH	% M.O	Orden	Suborden
			A	L	AR					
LETRAS UMBRIC VITRANDEPTS/ PC-2	C3	66-110	98	1	1	A	5.7	0.2	Inceptisol	Andepts
		44								

Tabla 17. Propiedades físico-químicas UMBRIC VITRANDEPTS. Fuente: (IGAC, 2004)

La anterior tabla demuestra específicamente la composición granulométrica que presentan suelos de tipo “*Umbric Vitrandepts*” los cuales son comúnmente compuestos por capas gruesas de arenas volcánicas y piedra pómez. Se seleccionó la clasificación correspondiente al horizonte C3 esta profundidad, ya que representa una profundidad similar al suelo de estudio, el cual comprende una profundidad de 80-120cms, siendo el espesor de este 40 cms. Finalmente se obtuvo una textura arenosa; puesto que su composición granulométrica se encontró distribuida de la siguiente manera: 98% arena, 1% limo y 1% arcilla. El orden y el suborden, de acuerdo a la clasificación de los suelos de los Estados Unidos (Soil Taxonomy), fue extraída del capítulo 5 “Génesis y taxonomía de los suelos” del estudio General de suelos de Caldas, realizado por el IGAC.

Nombre del suelo/ Clasificación	Profundidad cm	Granulometría % Bouyoucos			Textura	pH	%C	Orden	Suborden
		A	L	AR					
SANTA ISABEL HYDRIC DYSTRANDEPTS PC-9	50-110	76	20	4	FA	6.0	1.95	Inceptisol	Andepts

Tabla 18. Propiedades físico-químicas HYDRIC DYSTRANDEPTS. Fuente: (IGAC, 2004)

La anterior tabla hace referencia a la clasificación taxonómica americana del suelo “*Hydric Dystrandeps*”, los cuales se caracterizan por presentar un “relieve ligeramente ondulado a escarpado y un poco más alejado de los conos volcánicos.

Se encuentran suelos profundos, evolucionados a partir de materiales piroclásticos y con menos porcentajes de arenas” (IGAC, 2004, p.53); específicamente los suelos de nombre Santa Isabel (SI), “muestran una capa gruesa de color oscuro y rica en materia orgánica, que descansa sobre materiales muy profundos de color pardo amarillento” (IGAC, 2004, p.55)

De acuerdo a la tabla 19, no se nombra un horizonte específico, ya que en la tabla A-1 del IGAC de la cual se extrajo la anterior información, simplemente se resalta la profundidad del horizonte, la cual es similar a la profundidad del suelo de estudio. De esta manera la composición granulométrica se encuentra distribuida, así: 76% arena, 20% limo y 4% arcilla, en cuanto a la textura se evidencia que es franco arenoso (FA), de acuerdo a las anteriores composiciones granulométricas; sin embargo en el shapefile de suelos obtenido de Corpocaldas se clasifica este como un suelo con texturas francas a franco arcillosas, esto puede ser explicado mediante la siguiente teoría: “Estos suelos presentan un buen desarrollo de estructura y una adecuada porosidad y aireación; las texturas al tacto se aprecian entre francas a franco arcillosas, pero por métodos de laboratorio estas texturas se manifiestan como franco arenosas a arenosas francas, debido a que los suelos por su alto contenido de alófono son muy difíciles de dispersar”. El orden y suborden de los suelos se extrajo del Estudio General de suelos del IGAC. La densidad aparente aproximada es igual a: 0,70 g/cc.

Nombre del suelo/ Clasificación	Profundidad cm	Granulometría % Bouyoucos			Textura	pH	Orden
		A	L	AR			
REGIMEN GENERAL LITHIC TROPORHENTS PC-28	00-15	80	16	4	FA	5.0	Entisol

Tabla 19. Propiedades físico-químicas LITHIC TROPORHENTS. Fuente: (IGAC, 2004)

De acuerdo a la clasificación “*Lithic Troporhents*” del área de estudio, se encuentra que son suelos superficiales con una profundidad <40cms, los cuales pueden estar compuestos por estratos rocosos de origen metamórfico, su composición granulométrica, se encuentra distribuida, así: 80% arena, 16% limo y 4% arcilla. “En términos generales son bien a excesivamente drenados, de texturas francas a franco arenosas y de color pardo grisáceo muy oscuro a negro, en algunas ocasiones sobre pardo amarillento”. (IGAC, 2004) El orden del suelo, fue obtenido del estudio general de suelos del IGAC.

CONVENCION	NOMBRE	TIPO	PENDIENTE	EROSIÓN	MATERIAL PARENTAL	CARACTERÍSTICAS	CLASIFICACIÓN	TEXTURA	CODIGO TEX	PROFUNDIDAD	PH TOTAL	FERTILIDAD	DESCRIPCIÓN
Slef1	Consociación SANTA ISABEL	SI	ef	1	Depósitos espesos de cenizas volcánicas.	Profundos, bien drenados, texturas francas a franco arcillosas, ácidos a ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica.	Hydric Dystrandept	Francas a francoarcillosas	F, FA	Profundo 80 - 120 cms	Acido 5.0 - 6.0	Baja	Relieve ligeramente ondulado a fuertemente quebrado y escarpado, pendientes cortas y largas.
LEef1	Consociación LETRAS	LE	ef	1	Depósitos espesos de arenas y cenizas volcánicas.	Superficiales moderadamente profundos, bien drenados, ácidos a ligeramente ácidos, contenidos medios de materia orgánica, texturas gruesas.	Umbric Vitrandept	Arenas	A	Profundo 80 - 120 cms	Acido 5.0 - 6.0	Baja	Relieve fuertemente ondulado a escarpado, pendientes cortas a largas.
SRg		SR	G				Lithic Trophorthent, Roca	Franco arenosa	FA	Superficial < 40 cms	Acido 5.0 - 6.0	Muy baja	
LEd1	Consociación LETRAS	LE	D	1	Depósitos espesos de arenas y cenizas volcánicas.	Superficiales moderadamente profundos, bien drenados, ácidos a ligeramente ácidos, contenidos medios de materia orgánica, texturas gruesas.	Umbric Vitrandept	Arenas	A	Profundo 80 - 120 cms	Acido 5.0 - 6.0	Baja	Relieve fuertemente ondulado a escarpado, pendientes cortas a largas.
LEcd1	Consociación LETRAS	LE	cd	1	Depósitos espesos de arenas y cenizas volcánicas.	Superficiales moderadamente profundos, bien drenados, ácidos a ligeramente ácidos, contenidos medios de materia orgánica, texturas gruesas.	Umbric Vitrandept	Arenas	A	Profundo 80 - 120 cms	Acido 5.0 - 6.0	Baja	Relieve fuertemente ondulado a escarpado, pendientes cortas a largas.
LEde1	Consociación LETRAS	LE	de	1	Depósitos espesos de arenas y cenizas volcánicas.	Superficiales moderadamente profundos, bien drenados, ácidos a ligeramente ácidos, contenidos medios de materia orgánica, texturas gruesas.	Umbric Vitrandept	Arenas	A	Profundo 80 - 120 cms	Acido 5.0 - 6.0	Baja	Relieve fuertemente ondulado a escarpado, pendientes cortas a largas.
SRg		SR	G				Lithic Trophorthent, Roca	Francoarenosas	FA	Superficial < 40 cms	Acido 5.0 - 6.0	Muy baja	
LEef1	Consociación LETRAS	LE	ef	1	Depósitos espesos de arenas y cenizas volcánicas.	Superficiales moderadamente profundos, bien drenados, ácidos a ligeramente ácidos, contenidos medios de materia orgánica, texturas gruesas.	Umbric Vitrandept	Arenas	A	Profundo 80 - 120 cms	Acido 5.0 - 6.0	Baja	Relieve fuertemente ondulado a escarpado, pendientes cortas a largas.

Tabla 20. Modificación de tabla de atributos de suelos. Fuente: Autores.

La información correspondiente a las texturas del suelo se obtuvo del Documento Diagnóstico del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Florán, Santander y del Estudio General de Suelos, capítulo 3 realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Los códigos de las clases texturales se obtuvieron de la Guía para la Descripción de Suelos de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

En la Figura 17, se presenta el mapa correspondiente a los tipos de suelo contenidos en la zona de estudio, los cuales son: Slef1, LEef1, SRg, LEed1, LEcd1 y LEde1, cabe resaltar que la codificación de los tipos de suelos fue realizada por el IGAC al momento de elaborar los mapas temáticos; por esta razón en el mapa de suelos, se agrupan los suelos de acuerdo a sus características geomorfológicas y genéticas, identificadas por dos letras mayúsculas que indican el nombre de la unidad cartográfica, seguidas por letras minúsculas y número que determinan la pendiente y el grado de erosión.

De acuerdo a lo anterior, se emplearon los siguientes rangos por pendiente y erosión:

<b>Pendiente en %</b>	<b>Grado de erosión</b>
a= 1-3	1= Ligera
b= 3-7	2= Moderada
c= 7-12	3= Severa
d=12-25	
e= 25-50	
f= 50-75	

*Tabla 21. Rangos por pendiente y erosión. Fuente: (IGAC, 2004)*

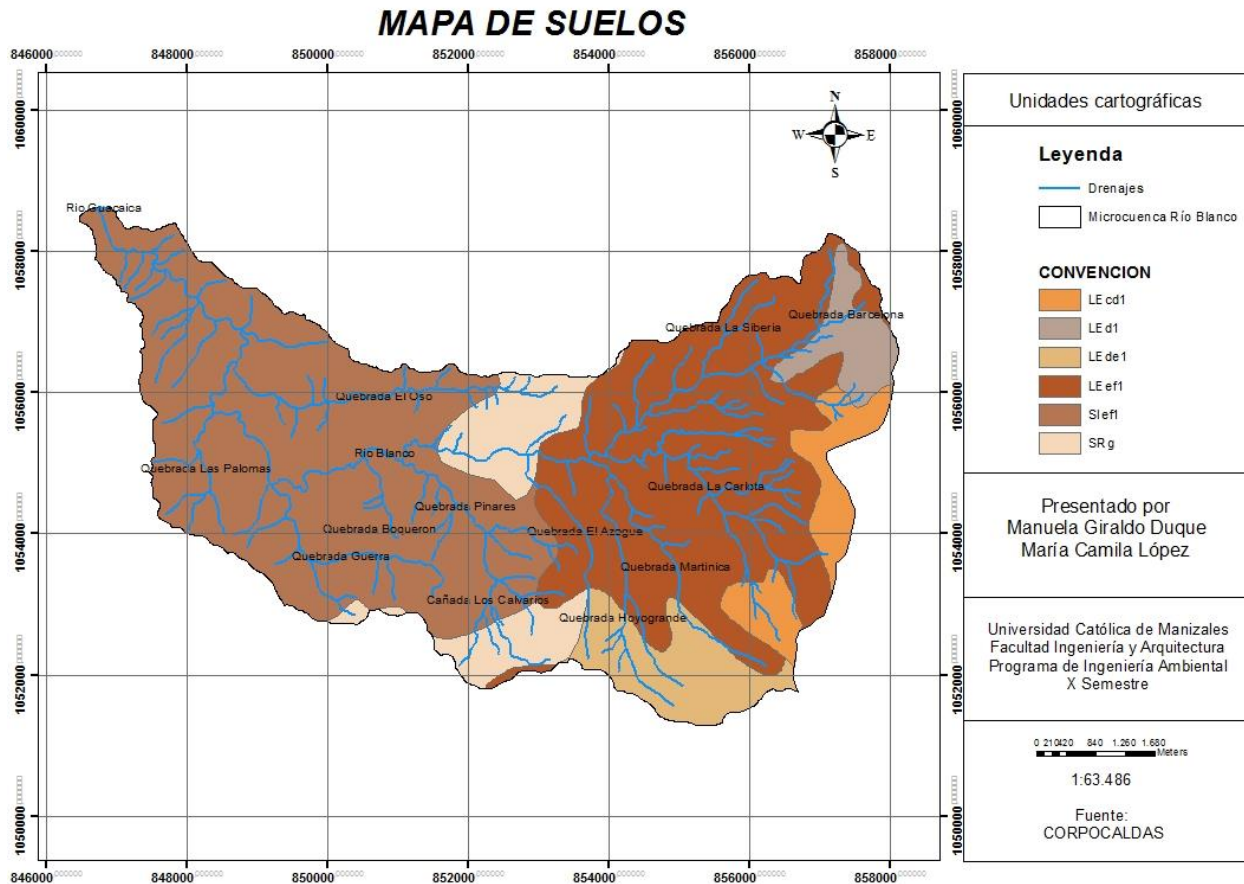


Figura 16. Mapa de suelos. Fuente: (Corpocaldas, 2016)

A continuación, se presentará una explicación detallada del tipo de suelo de la zona de estudio, de acuerdo al Estudio General de Suelos, departamento de Caldas realizado por el IGAC:

- **LEef1:** Este suelo es de tipo LE, lo cual indica que la unidad corresponde a la consociación letras, la agrupación de letras ef, indica que presenta pendientes de 25-50-75%, de relieve fuertemente quebrado a escarpado y el número 1, indica la erosión ligera de este suelo.
- **LEcd1:** Esta unidad cartográfica corresponde a la consociación Letras, con pendientes 7-12-25% de relieve ligeramente quebrado a quebrado y erosión ligera.
- **LEd1:** “Consociación letras, con pendientes 12-25%, de relieve quebrado y erosión ligera”. (IGAC, 2004)
- **LEde1:** La unidad cartográfica corresponde a la consociación Letras, con pendientes 12-25-50%, con relieve quebrado a fuertemente quebrado y erosión ligera.

- **Slef1**: “Indica que la unidad corresponde a la consociación Santa Isabel, con fases por pendientes 25-50% y mayores de 50% (50-75%), de relieve fuertemente quebrado a escarpado y un grado de erosión ligero”. (IGAC, 2004)
- **SRg**: (Suelo rústico de régimen general), este código indica que son “tierras misceláneas, con pendientes mayores del 75%, de relieve muy escarpado”. (IGAC, 2004)

La anterior información fue recopilada de la Tabla A-2, la cual corresponde a la Guía de las unidades de mapeo del IGAC.

A continuación, se presenta la distribución de las unidades cartográficas del área de estudio con su respectivo porcentaje de participación al interior de la microcuenca, en la tabla 22:

<b>NOMBRE</b>	<b>CONVENCIÓN</b>	<b>ÁREA (Ha)</b>	<b>%</b>
Consociacion SANTA ISABEL	Slef1	2013.82	43%
Consociacion LETRAS	LEef1	1580.46	34%
Suelo Rústico de régimen general	SRg	387.23	9%
Consociacion LETRAS	LEd1	158.39	3%
Consociacion LETRAS	LEcd1	233.38	5%
Consociacion LETRAS	LEde1	297.25	6%

*Tabla 22. Unidades cartográficas del área de estudio. Fuente: Autores.*

En la figura 18, se presenta la gráfica correspondiente a la cantidad (porcentajes) de unidades cartográficas contenidas en el área de estudio:

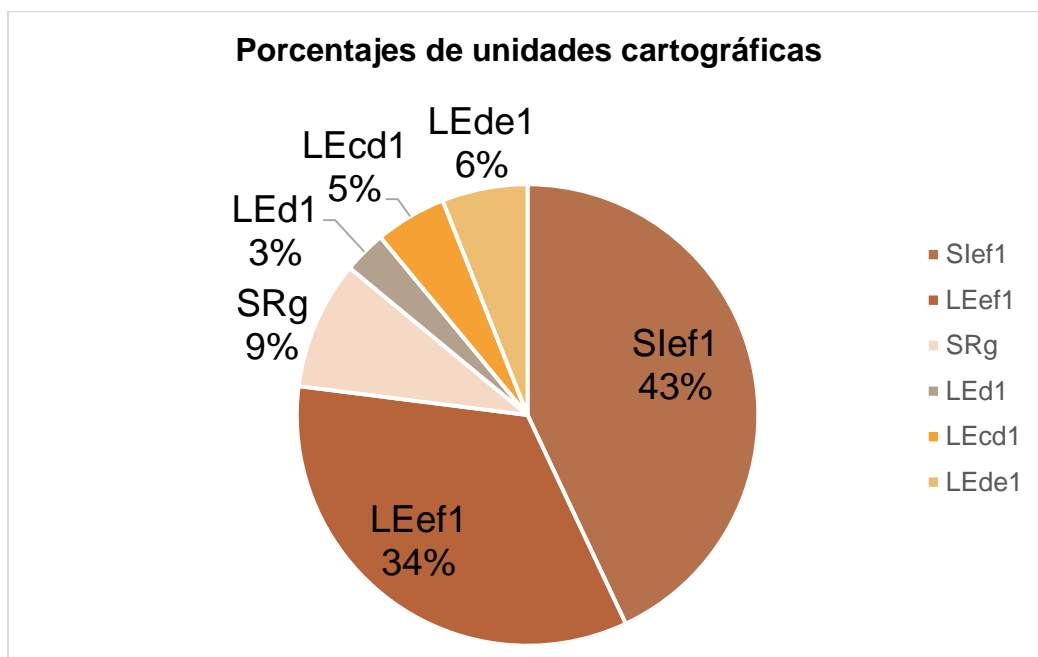


Figura 17. Porcentajes de unidades cartográficas, en el área de estudio. Fuentes: Autores.

De acuerdo a la anterior gráfica, se puede destacar que los suelos que desempeñan mayor participación dentro del área de estudio son suelos minerales de región húmeda, lo anterior de acuerdo a su pH, también se puede resaltar que son suelos que presentan una acidez moderada (pH 5.0-6.0). Estos suelos presentan pendientes entre 25 y 75%; por lo tanto se presenta un relieve ondulado a ligeramente quebrado y escarpado, en cuanto a la textura de estos suelos se cuenta con: arenosos y franco arcillosos.

Como se mencionó en la Fase I, de acuerdo a la información de suelos necesaria, es indispensable contar con la información de 19 parámetros, para lograr la modelación hidrológica en SWAT; sin embargo la información de suelos proporcionada carece de algunos datos, en donde algunos de estos se indagaron y obtuvieron del estudio general de suelos de Caldas, resaltando que no fue posible obtener la totalidad de parámetros fisicoquímicos para las tres taxonomías americanas del suelo, por esta razón a continuación en la tabla 23 se presenta un diagnóstico de la información de suelos obtenida y de igual manera de la información carente, pero con posibles métodos para su obtención:

INFORMACIÓN DE SUELOS REQUERIDA	DIAGNOSTICO	METODOS DE OBTENCIÓN
Unidad cartográfica	<input checked="" type="checkbox"/>	
Taxonomía	<input checked="" type="checkbox"/>	
Porcentaje de cada taxonomía	<input checked="" type="checkbox"/>	

INFORMACIÓN DE SUELOS REQUERIDA	DIAGNOSTICO	METODOS DE OBTENCIÓN
Perfil	<input checked="" type="checkbox"/>	
Horizonte	"En algunos casos", solo se presenta en el tipo taxonómico UMBRIC VITRANDEPTS	IGAC
% de arena	<input checked="" type="checkbox"/>	
% de arcilla	<input checked="" type="checkbox"/>	
% de limo	<input checked="" type="checkbox"/>	
Textura	<input checked="" type="checkbox"/>	
pH	<input checked="" type="checkbox"/>	
% Carbono	"En algunos casos", solo se presenta en la clasificación taxonómica HYDRIC DYSTRANDEPTS	IGAC
% de materia orgánica	"En algunos casos", solo se presenta en la clasificación taxonomica UMBRIC VITRANDEPTS	IGAC
Grupo hidrológico	<input type="checkbox"/>	Mapa de grupo hidrológico
Densidad aparente del suelo	"En algunos casos", solo se presenta en la clasificación taxonómica HYDRIC DYSTRANDEPTS	Software "SPAW" (Soil Wather Characteristics)
Capacidad de agua disponible	<input type="checkbox"/>	Software "SPAW" (Soil Wather Characteristics)
Conductividad hidráulica	<input type="checkbox"/>	Software "SPAW" (Soil Wather Characteristics)
Contenido de materia orgánica	<input type="checkbox"/>	Se puede obtener mediante el cálculo de materia orgánica de Van Benmelen.
Albedo del suelo	<input type="checkbox"/>	Se logra obtener mediante ecuación propuesta por Baumer (1990)
Usle	<input type="checkbox"/>	Se calcula con base en la ecuación universal de pérdida del suelo (Wischmeier y Smith)

Tabla 23. Diagnóstico de información de suelos. Fuente: Autores



- Geología: El shapefile de geología fue obtenido por medio de la recopilación, “estado del arte” de la información suministrada a través de CORPOCALDAS; siendo el archivo proporcionado, perteneciente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), ya que esta es la entidad encargada de divulgar la información geográfica del país. Este shapefile posee toda la información cartográfica del departamento de Caldas, el cual se utilizó para la extracción de la capa de la microcuenca de estudio, utilizando la herramienta “Clip”, mediante ArcGIS.

De esta manera, en la figura 19 se muestran las 9 unidades litológicas que componen la Microcuenca Río Blanco, las cuales revelan información sobre el macizo rocoso, tipo de formación, condiciones de presión y temperatura, rasgos químicos y su composición mineralógica; además determina la edad de formación de las rocas que conforman el suelo de la zona de estudio.

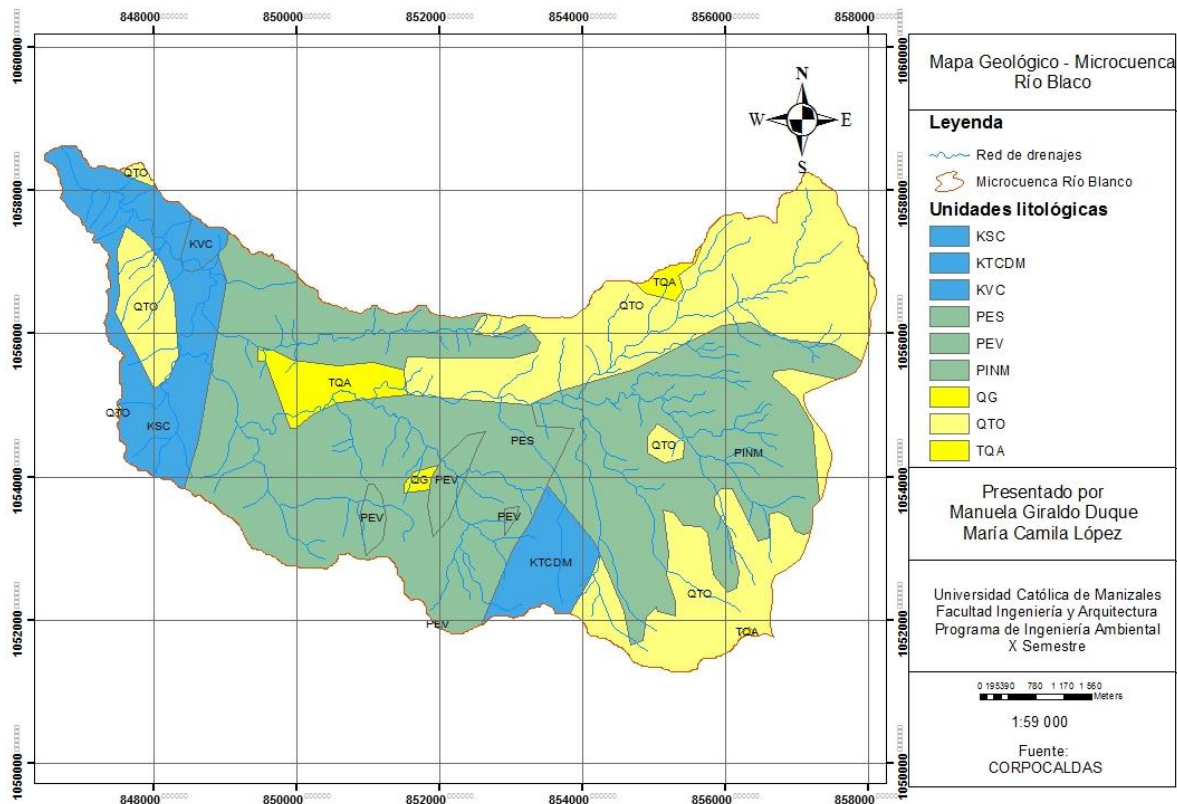


Figura 18. Mapa Geológico. Fuente: (Corpocaldas, 2016)

La asignación de colores al mapa geológico, en la figura 19, se realizó mediante la tabla cronoestratigráfica internacional (2015), teniendo en cuenta la eratema, el sistema y la serie de los complejos rocosos, es decir las unidades cronoestratigráficas Mesozoica,

Paleozoica, Mioceno y Cuaternaria. Se tuvo en cuenta esta determinación ya que no se contó con información geológica detallada del área de estudio.

Las unidades litológicas mencionadas anteriormente, se encuentran distribuidas de la siguiente manera:

Nombre	Convención	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Complejo Quebrada Grande Sedimentario	KSC	445.84	9.55%
Depósitos Piroclásticos - Glaciofluviales	QTO	1346.39	28.83%
Complejo Cajamarca - Filitas	PES	1462.09	31.30%
Complejo Quebrada Grande Volcánico	KVC	31.75	0.68%
Flujos Andesíticos Porfíricos	TQA	140.52	3.01%
Introsivos Heisicos y Anfibolitas	PINM	991.83	21.24%
Complejo Cajamarca - Esquistos Verdes	PEV	78.32	1.68%
Depósitos Glaciares	QG	10.47	0.22%
Stock Manizales	KTCDM	163.33	3.50%
<b>Total</b>		4670.55	100.00%

*Tabla 24. Distribución de unidades litológicas del área de estudio. Fuente: Autores*

A continuación, se presentan los porcentajes que indican la presencia de diferentes cuerpos rocosos en el área de estudio:

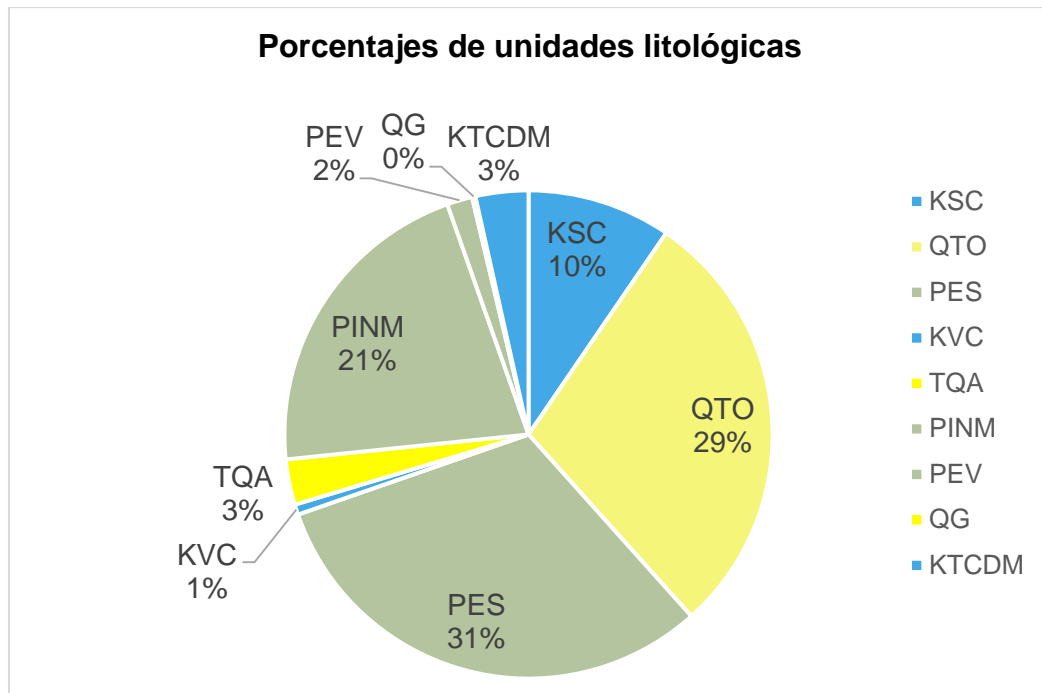


Figura 19. Porcentajes de unidades litológicas, en el área de estudio. Fuente: Autores

Como se observa anteriormente, es evidente la participación del Complejo Cajamarca – Filitas (PES) en gran parte de la microcuenca, ya que este complejo rocoso representa en gran medida la formación de suelos en la parte media de la microcuenca, teniendo esta unidad un área de 1.462 Ha y un porcentaje de participación del 31%, sobre un área total de la microcuenca de 4.670 Ha. Identificando así esta unidad litológica como una de las más antiguas, la cual forma parte de la edad paleozoica y está conformada principalmente por rocas metamórficas; esto de acuerdo al informe del estudio de “Geología, Geotecnia y Suelos”, realizado por el CEV (Consortio Estructuración Vial) del corredor 6 (Manizales-Honda-Guaduas).

Seguidamente se cuenta con un gran porcentaje de participación en la formación del suelo, por parte de los Depósitos Piroclásticos – Glaciofluviales (QTO), con un porcentaje del 29% y un área que abarca 1.346 Ha, estos depósitos hacen parte de rocas ígneas y pertenecen a la edad cuaternaria.

Finalmente, se tuvieron en cuenta los Intrusivos Gneisicos y Anfibolitas (PINM), los cuales aportan 991 Ha de área en el interior de la microcuenca, con 21% de participación en la formación del suelo. Estas rocas son de tipo metamórficas.

De esta manera, se puede concluir de acuerdo al POMCA del Río Chinchiná y al autor Michel Hermelín, que generalmente el municipio de Manizales está constituido sobre unidades litológicas de diferentes edades y por rocas de origen ígneo y metamórfico,

principalmente; sin embargo la zona de estudio presenta rocas de origen sedimentario en un 9% de la extensión de la misma, siendo así la formación de las vertientes montañosas del municipio, se asocian con la evolución de la cordillera Central en un ambiente dinámico donde su geología está conformada por unidades que van desde el Paleozoico, pasando por el Mesozoico y finalmente por unidades Cenozoicas, teniendo así el área de estudio una compleja dinámica geológica.

### 3.2.2. Información temporal

- Información climática:

La información climática requerida por el SWAT se resume en precipitación y temperatura a escala diaria; el período del proyecto comprende desde el año 2006 hasta el año 2016, abarcando así un período de 11 años. Para obtener esta información, se requieren estaciones meteorológicas que monitoreen la zona de estudio y aporten estos datos. Se identificaron tres estaciones y cuatro pluviómetros en la zona de estudio, como se observar en la tabla 25:

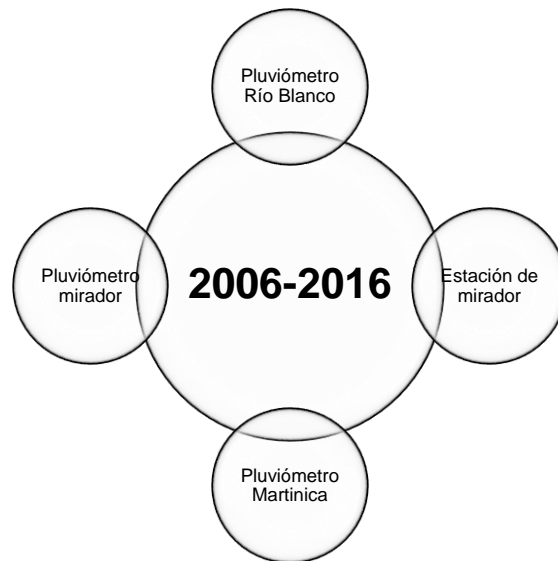
ID	NOMBRE	LONGITUD	LATITUD	FUENTE
1	Estación de mirador/Pluviómetro mirador	-75,44	5,078889	Aguas de Manizales S.A
2	Pluviómetro Olivares	-75,45111111	5,068889	Aguas de Manizales S.A
3	Pluviómetro de Martinica	-75,38194444	5,07	Aguas de Manizales S.A
4	Pluviómetro Río Blanco	-75,36805556	5,12	Aguas de Manizales S.A
5	Estación el Alto de la coca	-75,418275	5,081531	IDEA
6	Estación Quebrada Olivares-Bocatoma Río Blanco	-75,44713611	5,065356	IDEA

Tabla 25. Estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Fuente: Autores.

Por medio de la herramienta de creación de polígonos de Thiessen se identificaron los polígonos que definen el área de influencia de los puntos, que en este caso son las estaciones. Como se puede observar en el Anexo H, el pluviómetro Olivares y la Estación Quebrada Olivares-Bocatoma Río Blanco quedan fuera del área de influencia según la interpolación de las estaciones, por lo tanto se descartaron; mientras que los pluviómetros Río blanco y Martinica y las estaciones Mirador y Alto de la Coca, tienen una cobertura significativa sobre la Microcuenca Río Blanco.

La estación Alto de la Coca es una estación relativamente nueva, por lo tanto, se cuenta con información a partir del año 2015, lo que reduce la información apta para el modelamiento por medio de SWAT. De manera que las estaciones y pluviómetros que

cumplen con la información suficiente para cubrir el período de estudio entre 2006 y 2016, son:



*Figura 20. Estaciones y pluviómetros seleccionados. Fuente: Autores.*

Como resultado de la interpolación de los pluviómetros Mirador, Martinica y Río Blanco y la estación Mirador, se obtuvo el área de influencia de cada uno de ellos, teniendo en cuenta su ubicación con respecto a la Microcuenca Río Blanco tienen una cobertura de la parte alta, media y baja de la microcuenca. Los pluviómetros aportaron datos diarios de precipitación y la estación aportó los datos de temperatura a escala diaria, durante los años 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 y 2016.

Después de recopilación de la información de los pluviómetros Mirador, Martinica y Río Blanco y la estación Mirador, se organizó la información por medio de tablas dinámicas que permiten la manipulación adecuada y ágil de los datos.

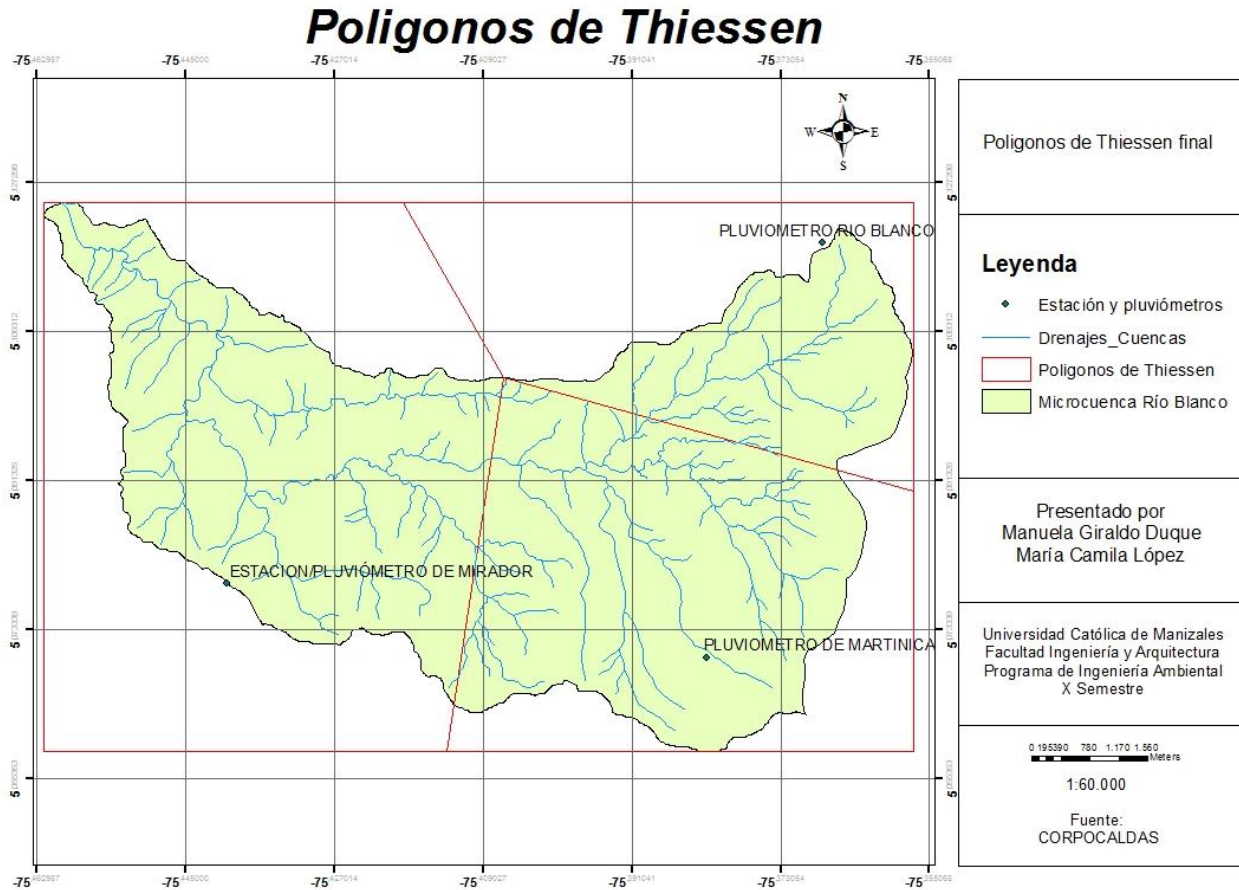


Figura 21. Polígonos de Thiessen final. Fuente: Autores.

Una vez organizada la información disponible de la estación Mirador, la cual corresponde a información climática del área de estudio, se encontraron vacíos de información, los cuales se deben ser resaltados, ya que estos crearán errores significativos al ejecutar en un futuro el modelamiento hidrológico de la Microcuenca.

De acuerdo al período de estudio que comprende desde el año 2006 hasta el año 2016, se encontraron respectivamente los siguientes faltantes de información climática:

AÑO	FALTANTES	% DE FALTANTES
2006	Faltan datos del 04/04/2006	2.6%
	Faltan datos del 01/10/2006	
2007	Faltan datos del 29/03/2007	11.4%
	Falta la totalidad Diciembre/2007	

<b>AÑO</b>	<b>FALTANTES</b>	<b>% DE FALTANTES</b>
2008	Faltan datos desde 19/08/2008 hasta 21/09/2008	12.7%
2009	COMPLETO	0.2%
2010	Faltan datos del 13/04/2010 y 14/04/2010	9.0%
	Falta la totalidad de Agosto/2010	
	Faltan datos correspondientes al día 01/11/2010	
2011	Faltan datos desde 26/02/2011 hasta 16/03/2011	18.0%
	Faltan datos desde 28/08/2011 hasta el 04/09/2011	
	Falta la totalidad de Diciembre/2011	
2012	Falta 01/01/2012	15.0%
	Falta el 30/06/2012	
	Faltan datos desde 30/11/2012 hasta 02/12/2012	
	Faltan datos desde el 13/12/2012 hasta el 31/12/2012	
2013	Falta el 27/02/2013 y 28/02/2013	7.0%
	Faltan datos desde 14/07/2013 hasta 17/07/2013, los datos cincominutales del 18/07/2013 están incompletos; seguidamente faltan datos desde 19/07/2013 hasta 31/07/2013	
	Falta 17/08/2013 y 18/08/2013	
	Falta desde el 28/12/2013 hasta 31/12/2013	
2014	Falta la totalidad de Abril/2014	9.0%
	Falta 31/07/2014	
2015	Faltan datos desde el 26/06/2015 hasta 30/06/2015	52.1%
	En el mes de Julio, solo se tienen datos del 01/07/2015	
	Falta la totalidad de meses desde Julio hasta diciembre	
2016	NO PRESENTA DATOS	100%

Tabla 26. Datos faltantes de estación meteorológica "Mirador". Fuente: Autores.

Dentro de la información recopilada de precipitaciones para los tres diferentes pluviómetros, se encontraron diferentes vacíos de información, los cuales se pueden observar en el Anexo I. Con respecto al pluviómetro Martinica, presenta un déficit de información únicamente en el año 2006 del 1% y en el año 2016 del 16%, desde el año 2007 al 2015 se encuentra completa la información.

Los datos más consistentes son los generados por el pluviómetro Mirador, pues no presenta vacíos de información a excepción del año 2016 con solo un 16% de vacíos correspondientes a los meses de noviembre y diciembre, en el Anexo J, se evidencia la información suministrada anteriormente:

La serie de precipitaciones provenientes del pluviómetro Río Blanco es la que contiene mayor cantidad de vacíos de información, pues para el año 2006 no existe ningún dato y únicamente hay completos 6 de los 11 años que corresponden al periodo de tiempo seleccionado, tal como se evidencia en la tabla 27:

<b>AÑO</b>	<b>FALTANTES PLUVIÓMETRO RIO BLANCO</b>	<b>% DE FALTANTES</b>
2006	NO PRESENTA DATOS	100%
2007	Faltan los meses: enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio	58%
2008	Faltan las fechas: 30/04/2008, 31/07/2008, 31/08/2008, 30/11/2008	1%
2009	Faltan las fechas: 30/01/2009, 31/01/2009, 31/03/2009, 31/12/2009.	4%
	Faltan los días desde el 25/02/2009 hasta el 28/02/2009	
	Faltan los días desde el 27/05/2009 hasta el 31/05/2009	
2010	COMPLETO	0%
2011	Faltan las fechas: 31/05/2011 y 30/06/2011	1%
2012	COMPLETO	0%
2013	COMPLETO	0%
2014	COMPLETO	0%



AÑO	FALTANTES PLUVIÓMETRO RIO BLANCO	% DE FALTANTES
2015	COMPLETO	0%
2016	COMPLETO	0%

Tabla 27. Datos faltantes del pluviómetro Río Blanco. Fuente: Autores.

### 3.3. Fase III: Evaluación y análisis de la calidad de la información seleccionada, empleando las diferentes herramientas que proporcionan ArcGIS y Excel.

#### 3.3.1. Información espacial

Posterior a la recopilación de la información secundaria necesaria para cumplir con los temas requeridos por ArcSWAT, fue necesario evaluar y analizar la calidad de la información seleccionada, este proceso fue llevado a cabo mediante diferentes procesos los cuales se encargaron de corroborar la veracidad de la información seleccionada, lo anterior mediante la implementación de herramientas de ArcGIS y Excel.

##### 3.3.1.1. Modelo de Elevación Digital:

El llenado de sumideros, se debe realizar para garantizar la óptima representación de la cuenca, lo que quiere decir que, si no se realiza el proceso necesario de relleno, la red de drenaje puede ser discontinua, ya que al presentar la dirección de flujo cambios abruptos de pendientes, las celdas quedarán atrapadas en otras que tengan mayor elevación, impidiendo así el flujo del agua. A continuación, se presentará una vista de perfil de un sumidero antes y después de ser corregido:



Figura 22. Vista de perfil de un sumidero antes y después de ser corregido. Fuente: (ESRI, 2017)

De igual manera se deben ejecutar los picos, los cuales son celdas ilegítimas, que presentan una elevación mayor de acuerdo a las tendencias de la superficie.

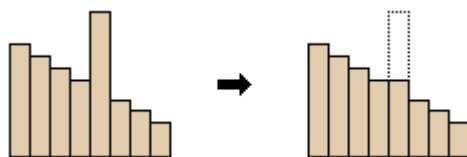


Figura 23. Vista de perfil de un pico antes y después de ser corregido. Fuente: (ESRI, 2017)

En consecuencia con lo explicado anteriormente, se obtuvo la siguiente vista en 3D para lograr evidenciar los errores del modelo:

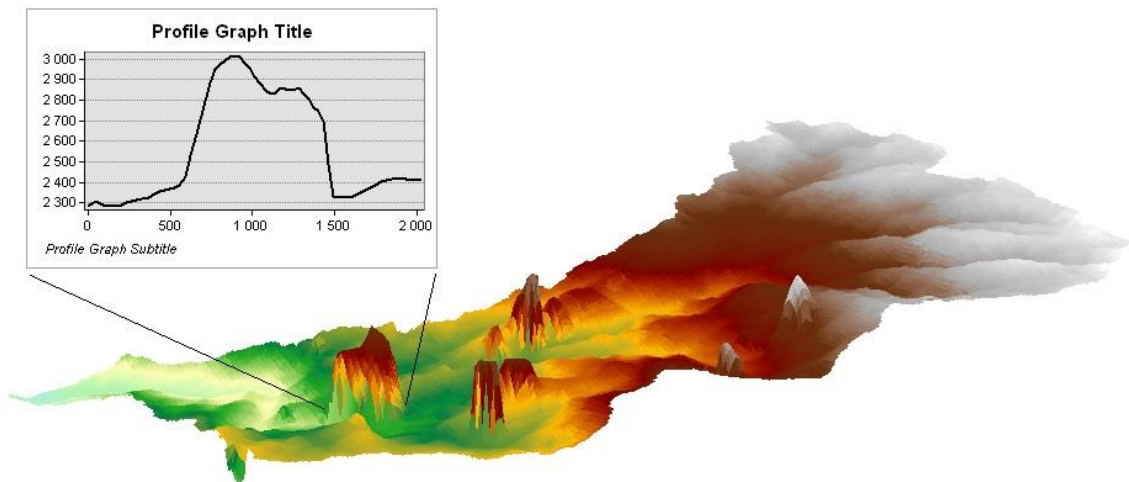


Figura 24. Vista 3D, DEM sin corregir. Fuente: Autores.

La anterior gráfica de perfil, se obtuvo con herramientas de ArcGIS y ArcScene, para lograr así una visualización en 3D de los errores existentes.

El perfil del DEM corregido, se presenta en el siguiente esquema, Figura 26:

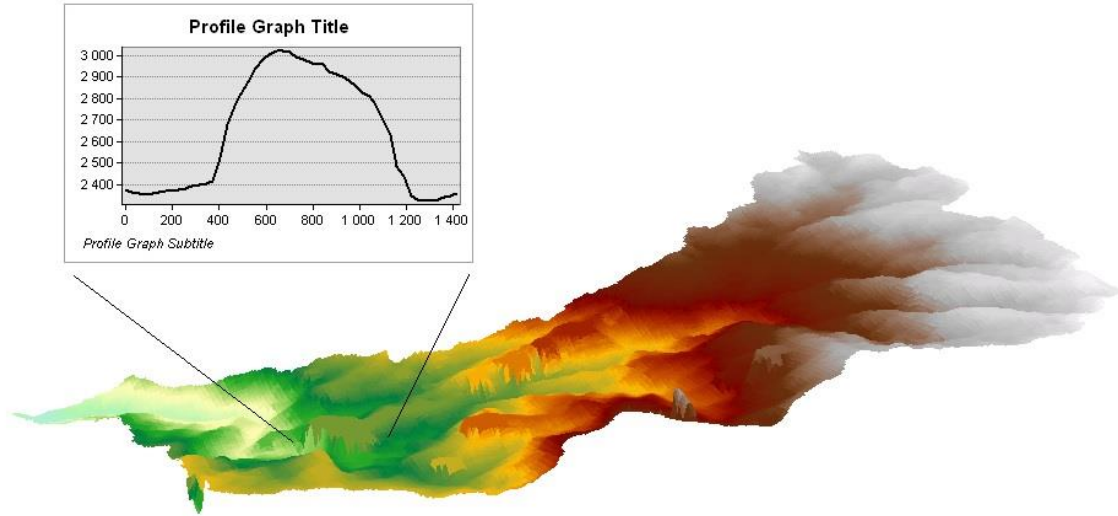


Figura 25. Vista 3D, DEM corregido. Fuente: Autores.

#### 3.3.1.2. Red de drenajes:

La red de drenajes está conformada por el cauce principal y sus tributarios, es decir esta se encarga de formar los lechos de cauce de la microcuenca. La red de drenaje del área de estudio, presenta una longitud de 18,086 km, lo cual indica que la microcuenca tiene un número de orden 4. A continuación, se presenta el mapa que contiene la representación del shapefile recopilado de la red de drenajes de la microcuenca Río Blanco, con sus respectivos afluentes.

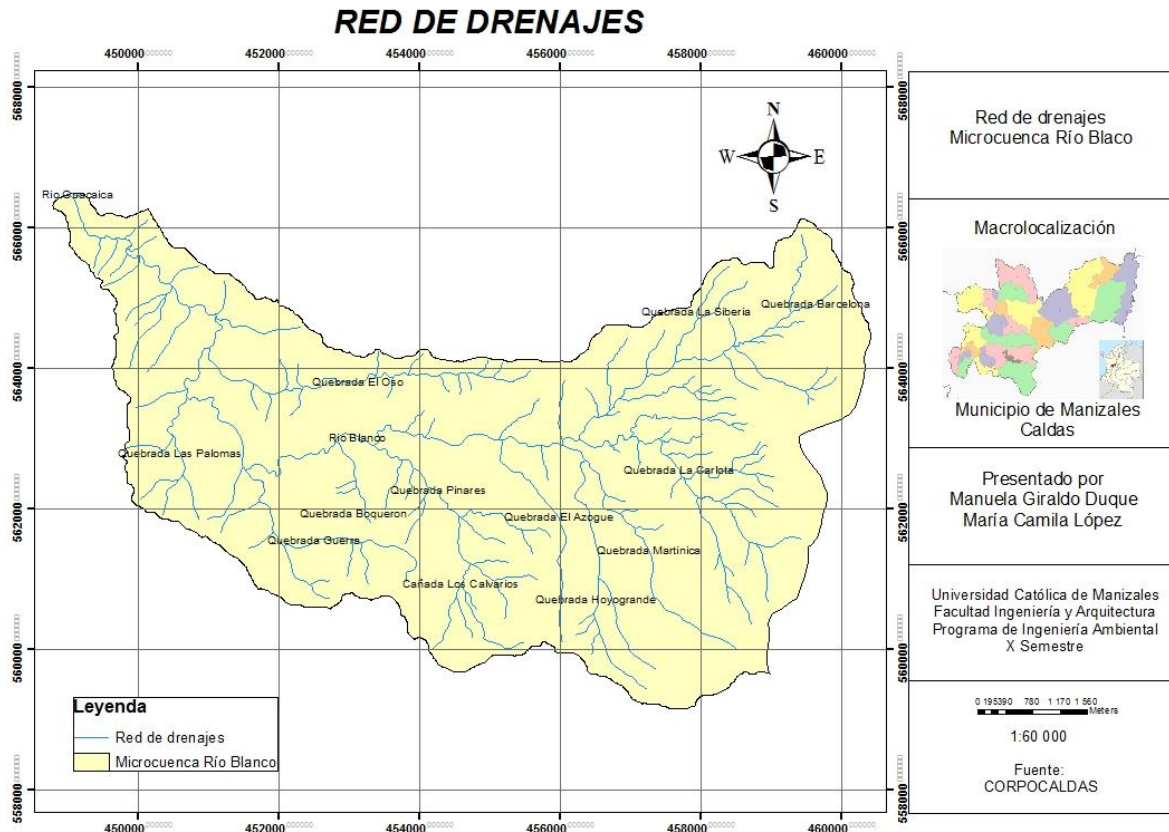


Figura 26. Mapa red de drenajes microcuenca Río Blanco. Fuente: (Corpocaldas, 2016).

○ Dirección de flujo

La dirección de flujo en cada celda se representa mediante ocho direcciones de salida válidas, las cuales se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo, en otras palabras, esta dirección del flujo “está determinada por la dirección más empinada de descendencia de cada celda o pixel” (Ruiz R & Torres H, 2008, p.17). Esta orientación se denomina como modelo de flujo de ocho direcciones (D8). Este enfoque fue presentado por Jenson y Domingue (1988), este proceso de codificación es basado en que el valor de salida de la dirección del flujo es un número entero (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128). Los valores para cada dirección del centro son los siguientes:

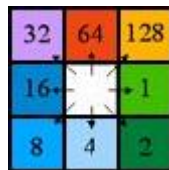


Figura 27. Códigos de la dirección de flujo. Fuente: (Greenlee, 1987)

Explicación del proceso de codificación: “Por ejemplo, si la dirección de descenso más empinada está a la izquierda de la celda en proceso, su dirección del flujo sería codificada

como 16 (tomando el pixel un color azul oscuro). Si la dirección de descenso a todas las celdas adyacentes tiene el mismo valor, la vecindad de ésta es ampliada hasta encontrar una empinada descendente mayor”. (Ruiz et al., 2008, p. 18)

Cuando se presenta que las celdas adyacentes son más empinadas, que la celda procesada, esta es estimada como ruido y se llena con el valor más bajo de sus celdas adyacentes. “Sin embargo, si es una celda hundida cerca al borde físico de la matriz o que tenga al menos una celda adyacente sin datos (NODATA), entonces ésta no será llenada debido a la insuficiente información de la celda vecina. Para ser considerado como un verdadero sumidero de celdas, todas las celdas adyacentes deberán poseer información” (Ruiz et al., 2008, p.18). Una vez comprendido el proceso de codificación que desarrolla la herramienta de “Flow Direction”, se muestra en la Figura. 29, el mapa obtenido de este proceso

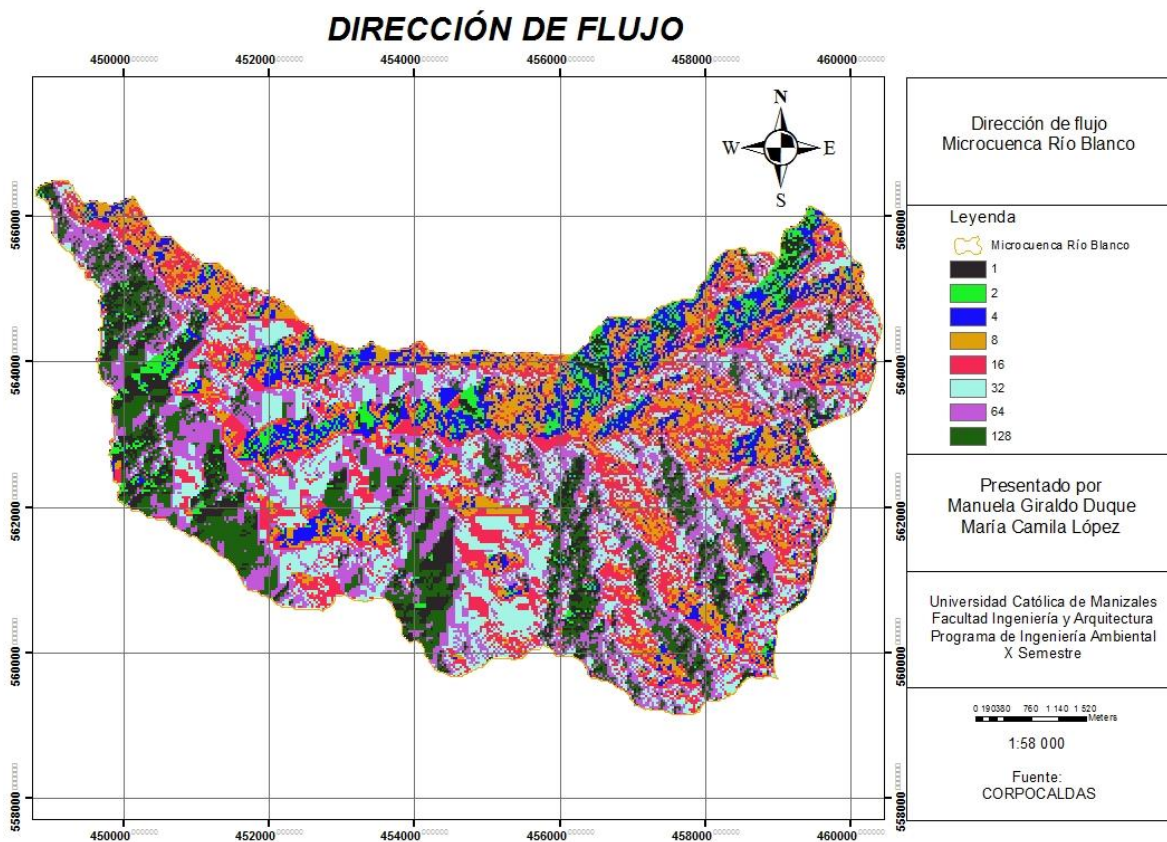


Figura 28. Mapa dirección de flujos Microcuenca Río Blanco. Fuente: Autores.

○ Flujo Acumulado

“El flujo acumulado está en función del número de celdas que fluyen hacia cada una de las celdas de la matriz de salida. La celda que están siendo procesada no se considera en tal acumulación”. (Ruiz et al., 2008, p.18)

En los siguientes esquemas de la Figura. 30, se muestra como desde la dirección de flujo, se obtiene un nuevo procesamiento de datos, el cual lleva a la reinterpretación de las direcciones de flujo, obteniendo así un peso acumulado en las celdas que fluyen hacia otras celdas de pendiente descendente en el ráster de salida, dando como resultado una acumulación significativa de flujo, representando así la red de drenajes.

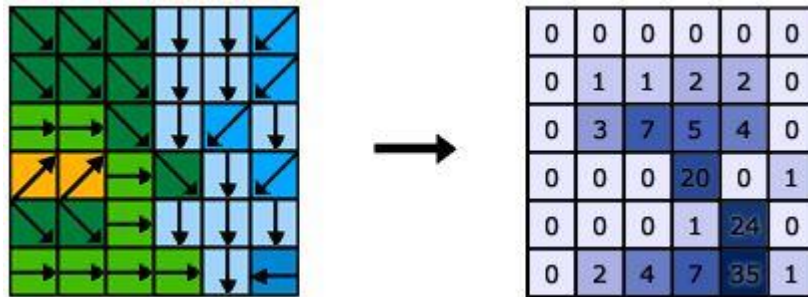
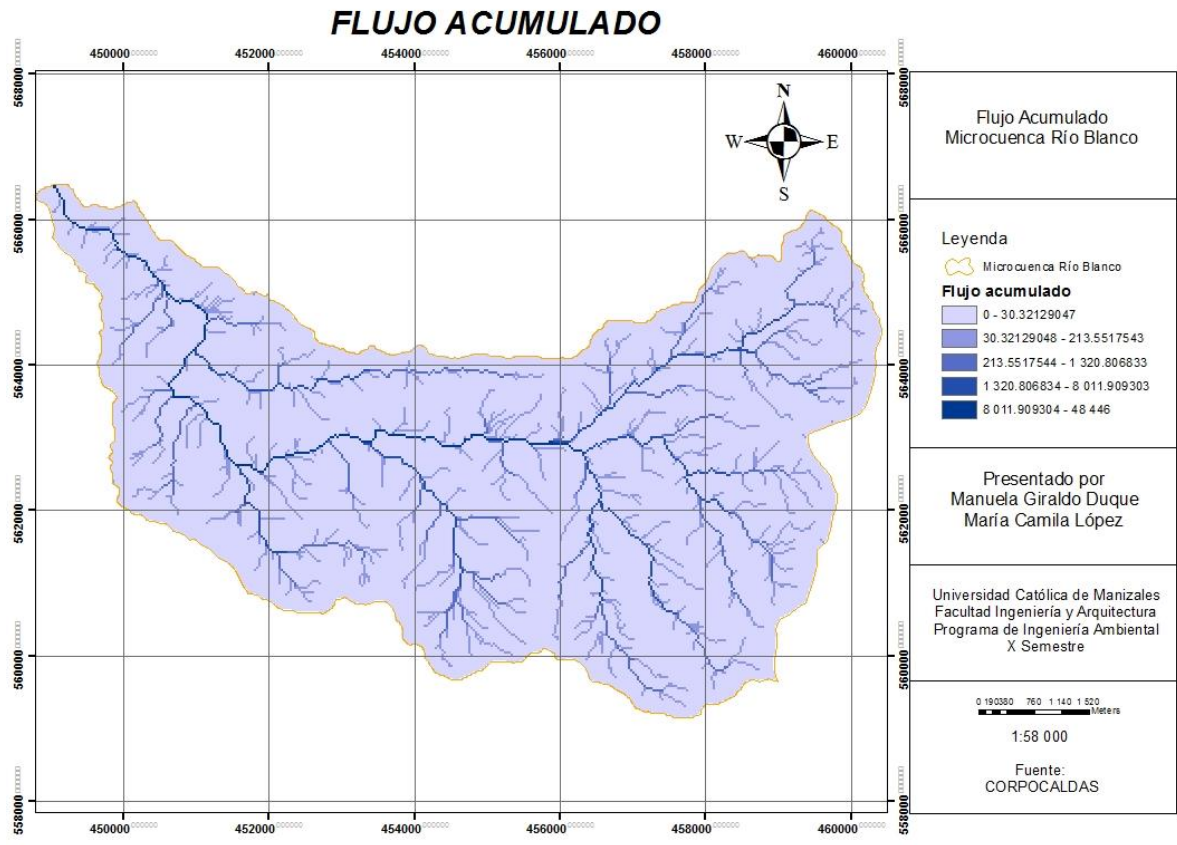


Figura 29. Flow direction Vs. Flow accumulation. Fuente: (Greenlee, 1987)

De acuerdo a la anterior figura, se evidencia que las celdas que se codifican con un valor diferente de cero, mostrarán que son áreas con flujo concentrado, es decir que obtuvieron un flujo acumulado significativo y mediante estas celdas será posible la identificación de los canales superficiales de flujo y posterior formación de la red de drenajes, mientras que las celdas que obtienen un flujo acumulado cero representan las alturas topográficas locales. Siendo así, en la Figura. 31, se logra observar el resultado obtenido de tal proceso.





*Figura 30. Mapa de Flujo acumulado microcuenca Río Blanco. Fuente: Autores.*

Como resultado, se obtuvo la red de drenajes de la microcuenca Río Blanco, de acuerdo al modelo de elevación digital corregido, de esta manera, es posible evaluar la calidad de la red de drenajes suministrada por CORPOCALDAS, el mapa que se muestra a continuación es una sobreposición de la red de drenajes seleccionada y la red de drenajes creada para la ratificación de la veracidad de esta.

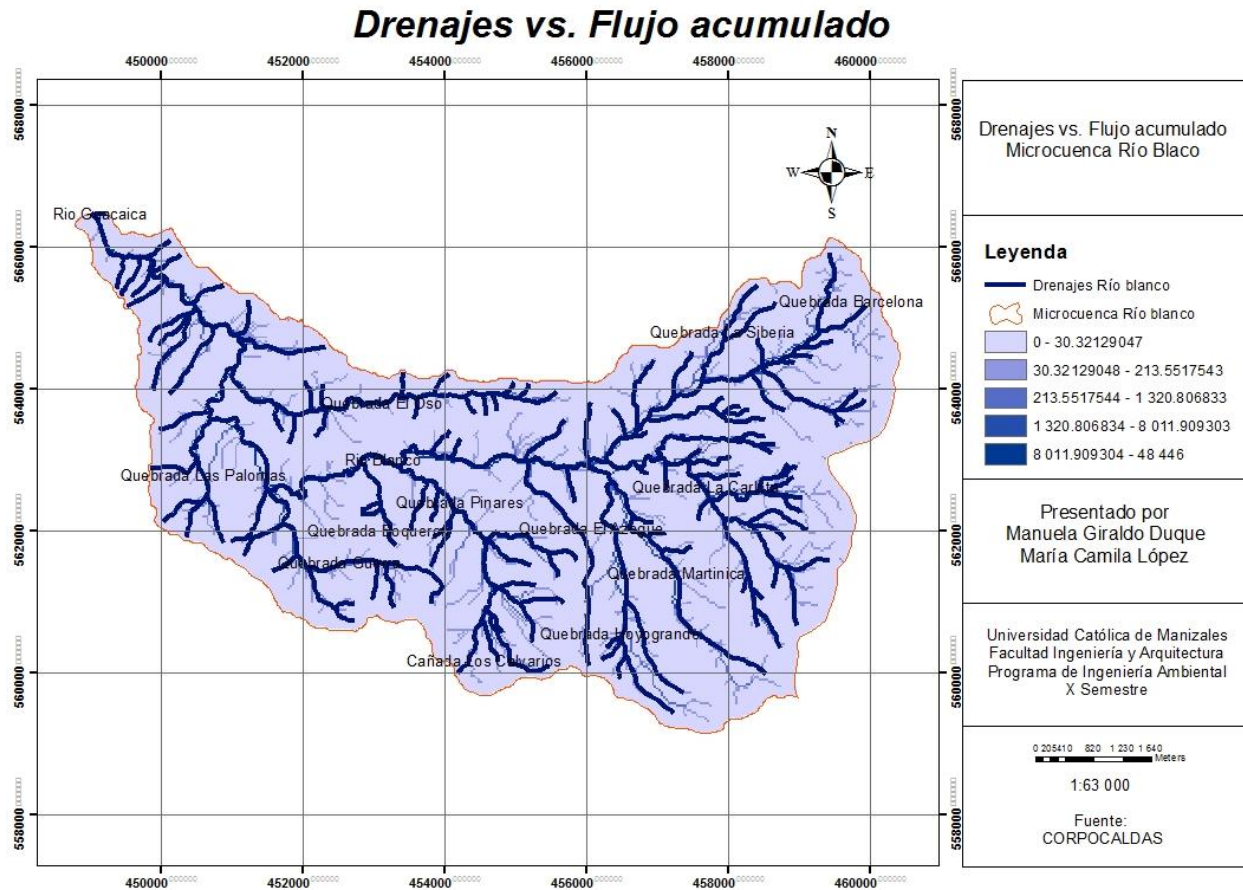


Figura 31. Sobreposición de red de drenajes recopilada Vs. red de drenajes creada. Fuente: Autores.

De acuerdo al anterior mapa se logra evidenciar la precisión obtenida entre el proceso de evaluación de la información de red de drenajes y el shapefile recopilado que contiene esta información; sin embargo se observa que la red de drenajes obtenida mediante el DEM corregido tiene mayor detalle de ramificaciones en comparación con la red de drenajes obtenida de Corpocaldas.

### 3.3.2. Información temporal

- Información climática

En cuanto a la información seleccionada de precipitaciones y temperatura, se obtuvo la Figura. 33, En la cual se observa la representación de la cantidad de datos vs. Promedio de temperatura (°C), con la finalidad de evidenciar los faltantes de información:



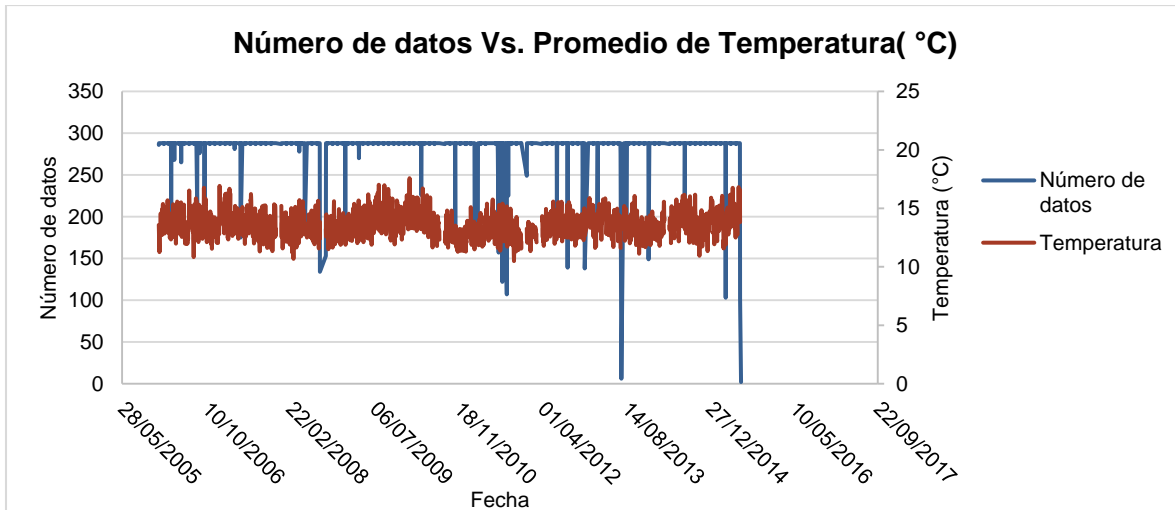


Figura 32. Cantidad de datos vs. Promedio de temperatura (°C), estación "Mirador". Fuente: Autores.

De acuerdo a la anterior gráfica, Figura.33, se logra apreciar que el número de datos, el cual se ubica en el eje de las ordenadas de la izquierda, presenta constantes, es decir, una línea horizontal consecutiva, en algunos casos; esto se debe a que los datos de información climática están completos, es decir, cuando estos alcanzan el valor de 288; debido a que diariamente se contó con un registro cincominutal de 288 datos de temperatura. Los datos realizan un descenso en la gráfica al presentar insuficiencia de los mismos y adquieren así valores mínimos al disminuir la cantidad de datos presentes para el análisis.

Finalmente la serie de temperatura muestra el promedio de esta, entre un rango de 10,49°C y 17,57°C, siendo estos respectivamente los valores mínimos y máximos del promedio de temperatura diaria en el período analizado (2006-2015), se debe aclarar de acuerdo a la gráfica que el año 2016, presenta un faltante total de datos lo cual provoco un análisis incompleto para el período determinado; el año 2015 también presenta una carencia parcial de estos, lo cual altera el objetivo de análisis de la información.

A continuación en la Figura 34, se presentan los promedios mensuales a lo largo del período analizado (2006-2015):

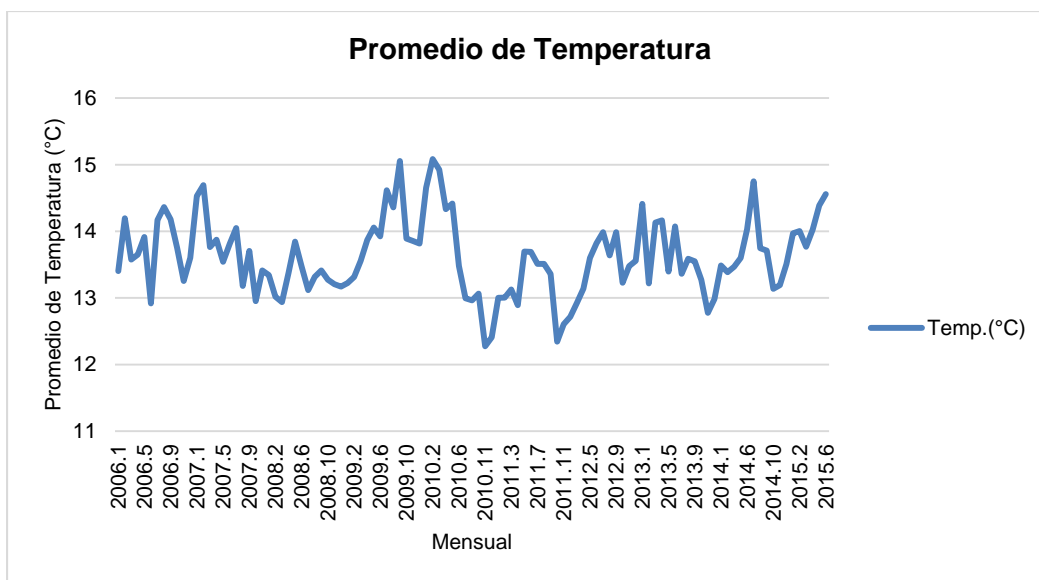


Figura 33. Promedio de temperatura (°C), estación “Mirador”. Fuente: Autores.

De acuerdo a la anterior gráfica, Figura 34, se logra determinar el promedio mensual de temperatura, el cual comprende los rangos desde 12,27°C hasta 15,08°C, lo cual determina un tipo de clima frío – húmedo, esto de acuerdo al análisis de información secundaria recopilada y al Plan de Manejo de la reserva forestal protectora Río Blanco realizado por Corpocaldas.

### 3.3.2.1. Climograma

Para obtener un diagrama climático se deben tener los valores de precipitación y temperatura de cada mes del año a estudiar, de esta manera se debe contar con la precipitación total caída durante el mes y la temperatura media mensual, esto de acuerdo al autor Korner. Tal como se explicó anteriormente y se evidencia en la tabla. 26 del Capítulo III, existe un faltante de datos total correspondiente al año 2016 en la estación meteorológica “Mirador”, en cuanto a temperaturas y por parte de las precipitaciones se encuentra un faltante del 16%, en el pluviómetro la misma estación.

En referencia a la explicación anterior, cabe considerar que los climogramas son datos de doble entrada donde se presentan los valores de precipitación, temperatura y clima en una estación meteorológica, es por esta razón que se deben tener en cuenta estaciones compuestas que contengan la totalidad de información meteorológica (fundamentalmente estaciones pluviométricas y climatológicas); sin embargo en este caso de estudio solo se cuenta con una estación climatológica principal la cual es “Mirador” y con esta se realiza la comprobación de datos seleccionados, confrontando estos con el pluviómetro perteneciente a la misma estación.

Con la elaboración del instrumento de análisis de calidad de la información seleccionada, climograma, se llevó a cabo la elaboración de este en un período total comprendido

desde el año 2006 hasta 2016, obteniendo el siguiente resultado, reflejado en la Figura 35:

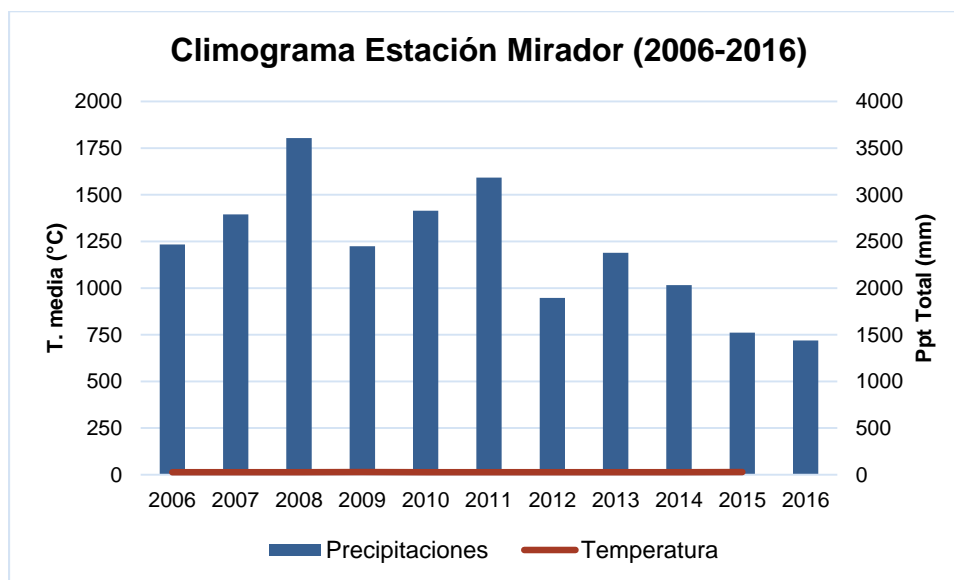


Figura 34. Climograma estación "Mirador" período 2006-2016. Fuente: Autores.

Como se observa en la anterior gráfica (Figura.35), las barras representan las precipitaciones caídas durante los respectivos años ubicados en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas en la izquierda, se muestra la escala de temperaturas la cual en este caso se encuentra desfasada de acuerdo al valor promedio de la temperatura; por esta razón no se evidencia claramente el promedio de temperaturas el cual es de 13,6°C, este se observa en la Tabla.28. Comparando esta con la escala de las precipitaciones ubicadas en el eje de la derecha de las ordenadas se evidencia que una escala es mayor que otra, esto debido a que la escala de las precipitaciones debe ser el doble de las temperaturas.

Años	T. media (°C)
2006	13.7
2007	13.8
2008	13.3
2009	14.0
2010	13.7
2011	13.1
2012	13.5
2013	13.6
2014	13.6
2015	14.1
<b>Total</b>	<b>13.6</b>

Tabla 28. Promedios de temperaturas medias registradas en la estación "Mirador" (2006-2015). Fuente: Autores.

Una vez explicada la estructura del diagrama climático, se observan algunos años significativamente altos y otros bajos o en condiciones normales, con respecto a la variación de las precipitaciones promedio anuales, esto se debe a la presencia de los fenómenos de variabilidad climática ENSO (“El Niño” Oscilación Sur), en su fase cálida “El Niño” y en su fase fría “La Niña”.

Inicialmente el año 2006, presenta un promedio de precipitaciones de 2.467mm la cual se encuentra dentro del rango de precipitación media total anual contenida en el atlas climatológico de Colombia desarrollado por el IDEAM, donde se estima un promedio para esta zona de estudio entre 2000-2500mm, este año registra una características neutrales en régimen bimodal, como se logra observar en el climograma del respectivo año (Ver Anexo M), seguido a esto se encuentra el año 2007 con un promedio total anual de precipitaciones de 2.789 mm, estas condiciones en conjunto con el año 2008, con un promedio total de 3.607mm, conforman el evento climático “Niña”, de acuerdo al boletín informativo sobre el monitoreo del fenómeno de “La Niña” elaborado por el IDEAM.

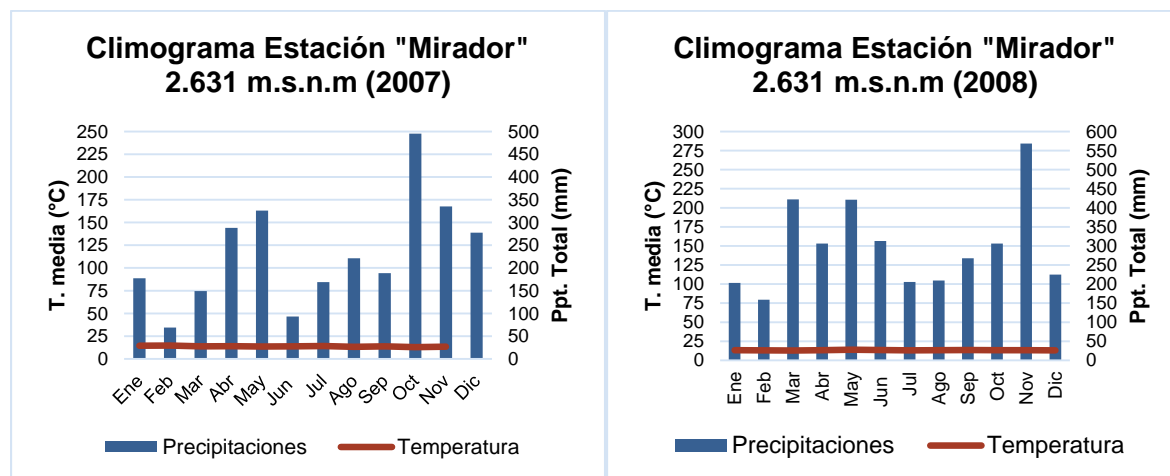


Figura 35. Climogramas año 2007 y 2008, correspondientes al evento climático "La Niña". Fuente: Autores.

Como se observa en la gráfica comparativa anterior, Figura.36, el fenómeno de “La Niña” inicia a finales del año 2007, comprobando este análisis con el “Pronóstico Estacional” realizado por el CIIFEN (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño), para los meses Agosto-Septiembre-Octubre 2007, se estimaron mayores probabilidades de lluvias por encima de los promedios históricos, esto mediante un análisis estadístico realizado de estaciones meteorológicas y condiciones oceanográficas y atmosféricas. Como se logra evidenciar en la gráfica de acuerdo al año 2007, el mes de mayor cantidad de precipitaciones es Octubre, el cual presentó una totalidad de 495,5 mm, siendo el mes más lluvioso, continuando con el 2008 se encuentra que el fenómeno de la Niña, provoco una intensidad mayor de precipitaciones inclusive en los trimestre de bajas precipitaciones, de esta manera se observa en la gráfica correspondiente a este año que las precipitaciones no disminuyen de 100mm en la

mayoría de los meses, lo cual conlleva a ser este el evento más fuerte de los períodos analizados.

De acuerdo a la anterior información del CIIFEN, se tuvo en cuenta este análisis probabilístico, ya que el IDEAM no contaba con un estudio detallado del fenómeno de “La Niña” ocasionado durante este período.

Continuando así el año 2009, presenta un promedio total anual de precipitaciones de 2.448mm el cual es considerado como un año que presenta un régimen bimodal normal, como se observa en climograma respectivo (Ver Anexo N), manteniendo las condiciones trimestrales húmedas y “secas”; sin embargo en el artículo científico elaborado por Gloria León Aristizabal, titulado “Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala sobre el noroccidente de Suramérica asociada al ciclo ENOS 2009-2010 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Colombia”, se logró conocer que entre el año 2009 y 2010, se presentó una transición de los eventos climáticos de “La Niña” a “El Niño” en junio de 2009, consecutivamente se presentó un retorno rápido a variabilidad climática “La niña”, en el primer trimestre húmedo del 2010.

En cuanto al año 2010 y 2011, se presenta nuevamente un ascenso en precipitaciones, con un promedio total de 2.829mm y 3.184mm, respectivamente; estos años hacen parte del evento climático de “La Niña” de acuerdo al IDEAM.

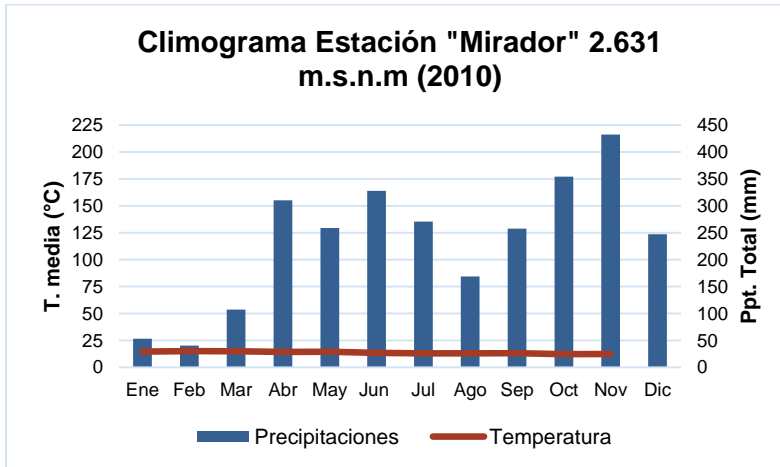


Figura 36. Climograma año 2010, correspondiente al evento climático "La Niña". Fuente: Autores.

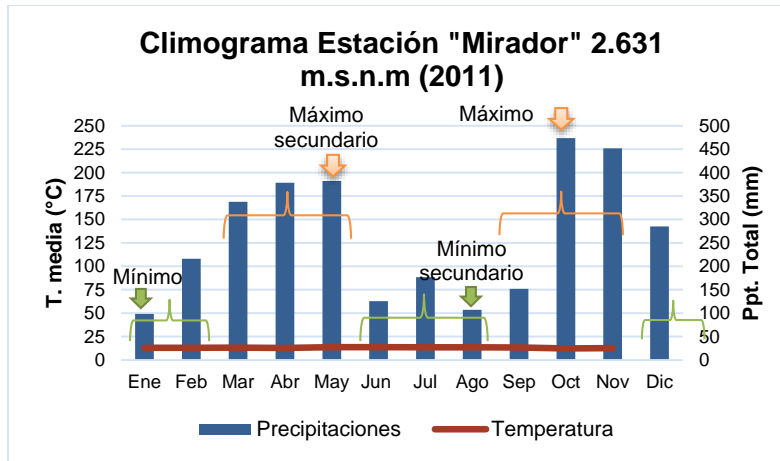


Figura 37. Climograma año 2011, correspondiente al evento climático "La Niña". Fuente: Autores.

En los anteriores diagramas climáticos presentados, se encuentra un clima bimodal; lo cual refleja que la precipitación inter-anual en Colombia presenta unos trimestres marcados por baja y alta pluviosidad al transcurrir un año, en algunas zonas del país. Los trimestres de baja pluviosidad son: Diciembre-Enero-Febrero y Junio-Julio-Agosto, frente a Marzo-Abril-Mayo y Septiembre-Octubre-Noviembre, que son de alta pluviosidad (Banco de Desarrollo de América Latina, 2016). De tal modo, lo explicado anteriormente logra evidenciarse en el climograma del año 2011, presentándose este en la Figura.38.

A partir del año 2010 en los meses que debían ser de baja pluviosidad, se presentaron precipitaciones extraordinarias, siendo así desde el mes de Junio, el cual debía ser el trimestre de variación temporal "seca" se inició la variación climática como se logra observar en el climograma correspondiente a este año, observándose en la Figura.37, este evento se intensifica en los meses de Octubre y Noviembre, continuando así en el año 2011 y manteniéndose durante el primer trimestre de lluvias del año el cual corresponde a los meses de marzo a mayo; sin embargo el fenómeno se alteró notoriamente en los meses de abril y mayo como se observa en el climograma (Figura 38), finalmente en este año se presentaron precipitaciones máximas registradas en el mes de octubre con un promedio total de precipitaciones de 473mm.

El análisis realizado anteriormente, se logró comprobar mediante el "Análisis del impacto del fenómeno La Niña en la hidroclimatología del país", desarrollado por el IDEAM, el cual obtuvo como resultado, de acuerdo con el ONI (Índice oceánico de "El Niño"), que el evento climático 2010-2011 inicio en el mes de Julio del 2010 y finalizó en Mayo del 2011; sin embargo mediante la gráfica se logra analizar que este evento inicia en Junio, soportando esto el análisis estacional desarrollado por el CIIFEN, el cual estimó mayor probabilidad de lluvia (< 60%) en el trimestre mayo-julio del 2010.

Siguiendo así el año 2012, presenta precipitaciones considerablemente bajas con un promedio total anual de 1.895mm, lo que conlleva a analizar la presencia del fenómeno

de variabilidad climática cálido “El Niño”, clasificada su intensidad según el IDEAM, como débil - moderada, de acuerdo al informe de “*Posibles efectos naturales y socioeconómicos del Fenómeno “El Niño” en el período 2012-2013 en Colombia*”

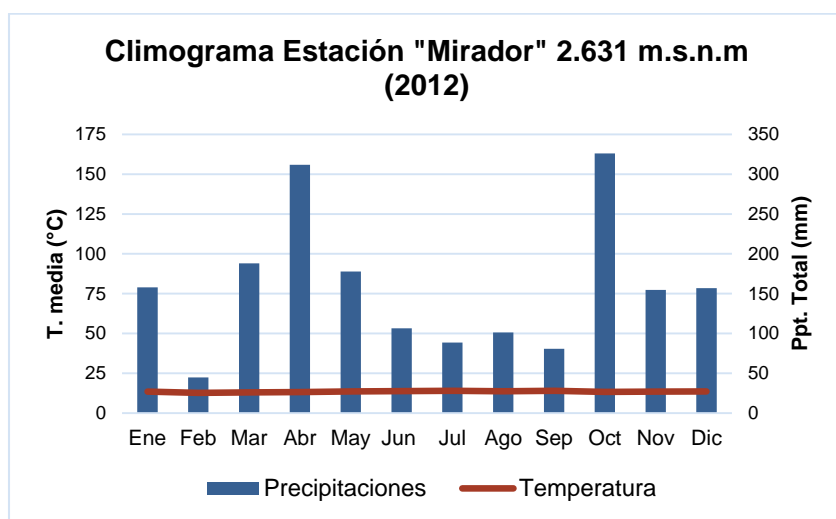


Figura 38. Climograma año 2012, correspondiente al evento climático "El Niño". Fuente: Autores.

Sin embargo en el climograma correspondiente al año 2012 (Figura 39), se evidencia una disminución considerable de precipitaciones en el mes de Febrero teniendo un promedio total de 44,8 mm de precipitaciones en el mes, solo se presentan precipitaciones significativas en los meses correspondientes a la primera y segunda variación húmeda del año, siendo estos abril y octubre respectivamente. En este sentido de acuerdo al informe del IDEAM ya mencionado, se encontró una transición a condiciones neutrales al transcurrir un evento “Niña” en el año posterior, siendo así en el mes de mayo, se acentúan las anomalías positivas de la temperatura superficial del mar (TSM), manifestando así el inicio a los escenarios de calentamiento, continuando así el mes de junio y julio con una reducción significativa de precipitaciones, extendiéndose esta condición hasta el mes de septiembre, momento en el cual la fase de lluvias del segundo trimestre del año debería retomar; sin embargo solo se presentan precipitaciones significativas en el mes de octubre (326mm) y continúa el impacto de este evento hasta comienzos del año 2013 (enero-febrero), como se observa en el climograma correspondiente a este año (Anexo O), temporada de menos lluvia de este año

En lo que resta del año 2013 y 2014, se mantienen las condiciones neutrales de un clima de régimen bimodal, como se observa en sus respectivos climogramas, (Ver Anexo O y Anexo P).

Finalmente los años 2015 y 2016, de acuerdo al “Informe sobre la evolución del fenómeno de variabilidad climática El Niño”, se indicó que el fenómeno de “El Niño” se

intensifico en el mes de agosto hasta finales del primer trimestre del año 2015 y primer trimestre del año 2016; debido a que en Agosto se presentaron anomalías de TSM y un debilitamiento significativo en los vientos alisios, consiguiendo así una transición de un evento débil a moderado, como se logra observar en la Figura 40.

Sin embargo no fue posible realizar el climograma correspondiente al año 2016, debido a los faltantes totales de información climatológica y faltantes parciales en precipitaciones, aunque con la información del año 2015, se logró comprobar la disminución de precipitaciones y aumentos en la temperatura, como se observa en la Figura 40, obteniendo significativamente  $24,3^{\circ}\text{C}$  durante los meses en los que se contó con información climática (Enero-Junio) comprobando así un evento de "El Niño" en este año, registrando así las precipitaciones totales anuales más bajas de acuerdo al período analizado en la zona de estudio, siendo estas 1.522 mm.

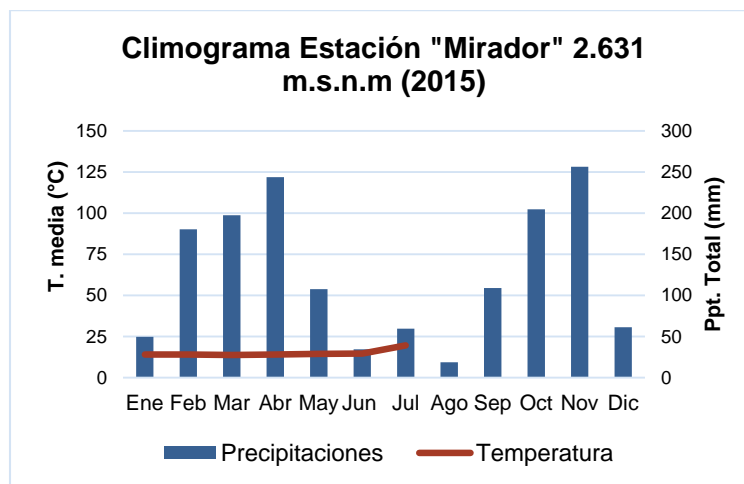


Figura 39. Climograma año 2015, correspondiente al evento climático "El Niño". Fuente: Autores.

### 3.3.2.2. Análisis de doble masa

El análisis de doble masa se realizó con el objetivo de identificar posibles inconsistencias en las series de datos pluviométricos desde el 2006 hasta el 2016.

En el Anexo L se puede observar la gráfica correspondiente a la estación base, siendo esta la más cercana a 1 en el valor de R, es decir, el grado de correlación de las variables fue de 0,996. Debido a esto la estación meteorológica Mirador fue seleccionada como estación base para el análisis de doble masa.



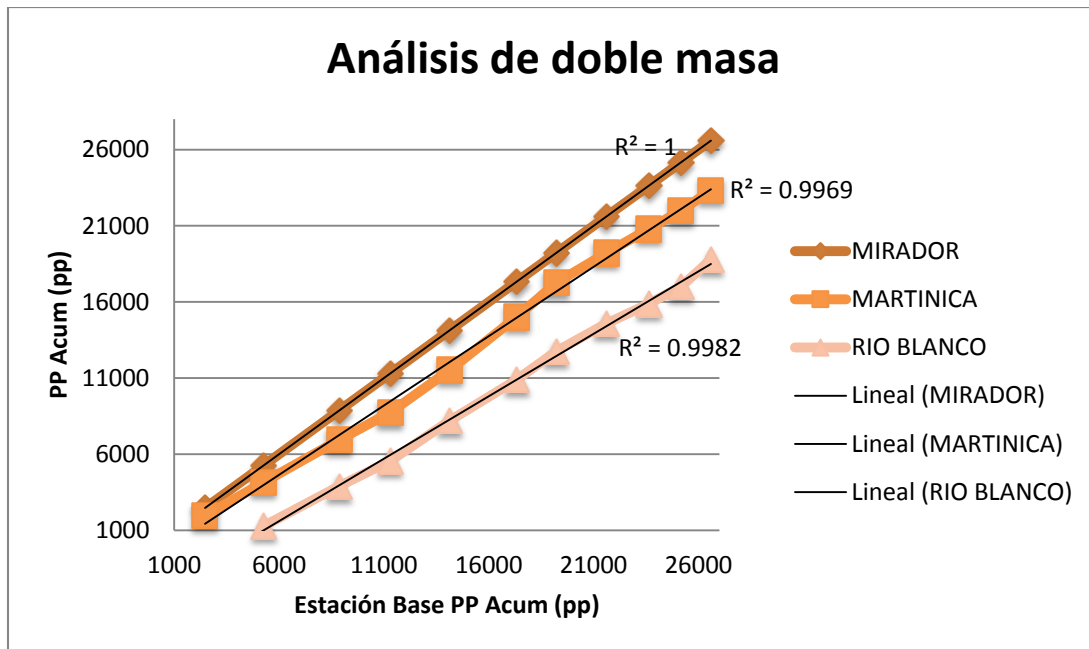


Figura 40. Análisis de doble masa de estaciones meteorológicas. Fuente: Autores.

En la Figura.41 se observa la estación base, con un grado de correlación igual a 1. De manera general las estaciones Río Blanco y Martinica tienen un coeficiente de relación superior a 0.99, lo que significa que las precipitaciones acumuladas de estas estaciones, incrementan de manera directamente proporcional con las precipitaciones de la estación Mirador (estación base), es decir, su comportamiento es similar y coherente con los datos de la estación base. Las estaciones se encuentran en el área de estudio, la cual se caracteriza por un solo clima, es por esto que los datos de las estaciones obedecen la línea de tendencia de la estación base.

Los posibles errores en la serie de datos están representados por quiebres en la recta. En las líneas de las estaciones Martinica y Río Blanco se pueden observar algunos quiebres correspondientes a errores causados por los vacíos de información, es decir, existen vacíos de datos que entorpecen el resultado real del acumulado de precipitaciones en un año determinado.

### 3.3.2.3. Métodos de estimación para completar datos climatológicos

Los datos faltantes en la series de información climática pueden ser completados por diferentes métodos estadísticos. Algunos métodos son sugeridos, en la tabla 29. A continuación.

Métodos	Descripción	Ecuaciones
<i>Método de la Razón q</i>	Este método es aplicado a pares de estaciones (A y B), en donde una de ellas tiene los datos completos y la otra no (Gidahatari, 2013)	$q = \frac{\sum bi}{\sum ai}$ <p>Donde:  <i>i</i>= desde 1 hasta N  N= Número total de datos <i>bi</i>= dato <i>i</i> de la estación B <i>ai</i>= dato <i>i</i> de la estación A</p>
	Una vez obtenido el valor de q, se procede a hallar el valor del dato faltante de precipitación en la estación B por medio de (Gidahatari, 2013)	$bj = q * aj$
<i>Curva de doble masa</i>	“Si se tienen las estaciones A y B, una con un registro de datos más extenso que la otra, y con datos consistentes, se puede utilizar el análisis de doble masa para extrapolar los datos” (Universidad de Los Andes Venezuela, s.f). Por medio de la gráfica y las pendientes de los datos graficados de cada estación	$Pb = \frac{Mb}{Ma} * Pa$ <p>Donde:  <i>Pb</i>= Valor de la precipitación a ser estimado.  <i>Pa</i>= Valor de la precipitación en la estación A para el periodo establecido  <i>Mb</i>= Pendiente de la curva doblemente másica para la estación B  <i>Ma</i>= Pendiente de la curva doblemente másica para la estación A</p>
<i>Método de regresión múltiple</i>	“Es recomendado para estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio, con base en datos pluviométricos o de temperatura consistentes de una estación cercana” (Gidahatari, 2013). Para emplear este método se establecer una correlación	$Y = a + b * x1 + c * x2 + \dots + n * xi$ <p>Donde:  Y= valor de precipitación estimada  Xi= valor de precipitación en estaciones con información completa  <i>a,b,c</i>= constantes de regresión</p>
<i>Método de regresión lineal simple</i>	“El cual está basado en la suposición de que dos variables se relacionan en forma lineal” (Aparicio, 2012, p.291), en general el objetivo de este modelo es lograr obtener el valor de una variable, la cual es variable dependiente (x), a partir del valor de la variable independiente (y). Este método es recomendado, cuando se tiene gran cantidad de datos faltantes.	$y = \alpha + \beta x$ <p>Donde:  y: variable independiente.  x: variable dependiente.</p>
		$\alpha = \frac{\sum yi \sum xi^2 - \sum xi yi \sum xi}{n \sum xi^2 - (\sum xi)^2}$ $\beta = \frac{n \sum xi yi - \sum xi \sum yi}{n \sum xi^2 - (\sum xi)^2}$

Tabla 29. Métodos para completar series de datos meteorológicos. Fuente: Autores

Los anteriores métodos pueden ser validados, mediante la prueba de rachas (prueba de una muestra de series aleatorias) o incluso mediante la curva de doble masa (siguiendo el procedimiento ya explicado).

La prueba de rachas es un “método no paramétrico cuyo objetivo es verificar que las observaciones sean aleatorias, siendo una racha cada cambio de símbolo” (Carrera, 2016, p.84) o la interacción entre elementos iguales dentro de una secuencia, por ejemplo: AAAABBAAABBBAAAAAABB.

La sucesión A representa valores por encima de la mediana (+) y B valores por debajo de la mediana (-). Esta prueba, se encarga de evaluar si el número de rachas es pequeño o grande, para aceptar las hipótesis  $H_0$ = existe aleatoriedad en la muestra o  $H_1$ = No existe aleatoriedad en la muestra (Carrera, 2016). Se recomienda llevar a cabo esta validación de datos, mediante el software SPSS (Producto de Estadística y Solución de Servicios), ya que este se encarga de establecer el resultado final, de acuerdo a los datos suministrados a la entrada del mismo, es decir, genera un resumen de prueba de hipótesis en el cual se esclarece si las series suministradas han sido o no aleatorias. Fue seleccionado este software, por la facilidad de manipulación y de obtención.





# CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES.



Universidad  
Católica  
de Manizales



#### 4. CONCLUSIONES

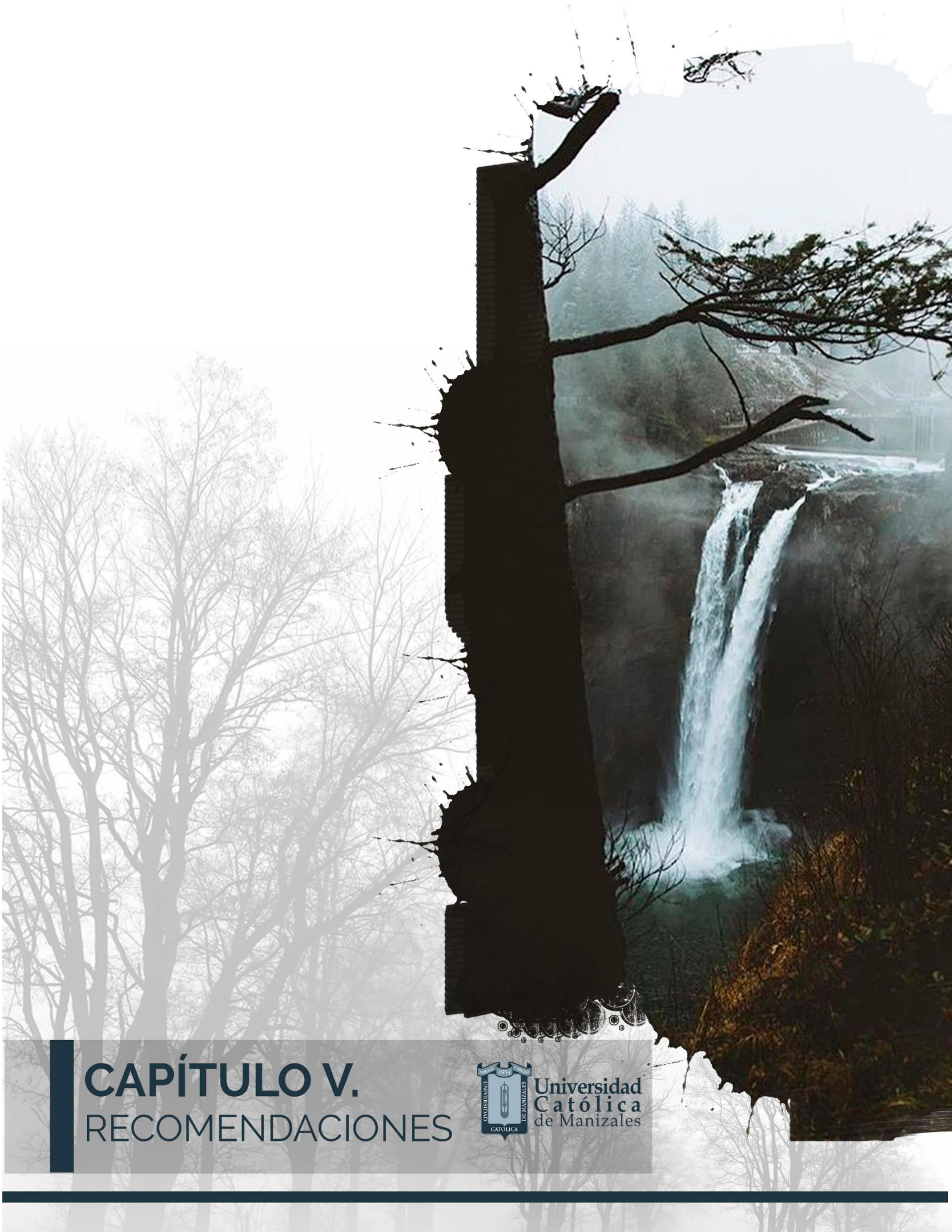
Con respecto primer objetivo específico, el SWAT, como modelo de simulación hidrológica, está diseñado para simular diferentes acontecimientos de manera simultánea en una cuenca compleja, esto ayuda a conocer la dinámica hídrica de la cuenca y predecir de manera integral los diferentes impactos ambientales a los que la cuenca es susceptible; si se ingresa rigurosamente toda la información requerida, el software puede ser empleado como una herramienta eficaz para la gestión y futuras decisiones a tomar sobre la microcuenca Río Blanco. En tal sentido, y pese a no referirse la investigación en particular a una cuenca compleja sino a una microcuenca, se considera el SWAT como una buena herramienta para modelado y simulación hidrológica.

En relación con el segundo objetivo y la experiencia local a través de la obtención de información de diversas instituciones encargadas del manejo hídrico, y debido a la complejidad y la magnitud en la demanda de información que el software requiere, se evidenciaron vacíos en la información requerida para que se alcancen resultados efectivos y confiables, base para estudios de ordenamiento de las cuencas hídricas. Es así como se concluye desde las tres fases de desarrollo del proyecto la necesidad de completar muchos de los datos faltantes constitutivos y necesarios para correr el SWAT.

Ejemplo puntual de ello evidenciado en los resultados del tercer objetivo, es que debido a la falta de información, no se pudo obtener una consistencia entre los datos pluviómetros de las estaciones El Mirador y el Alto de La Coca ni validar la similitud de eventos climáticos entre ambas estaciones que se presentan durante el periodo 2006-2016. Así mismo, la información pluviométrica y meteorológica obtenida por medio de Aguas de Manizales S.A E.S. P y el Instituto de Estudios Ambientales de Manizales tiene faltantes de datos pluviométricos significativos en la estación de Río Blanco para el año 2006 y en la estación meteorológica Mirador no existen datos de temperatura en el año 2016. El SWAT requiere una extensa información de suelos y sus características, lo que es una limitante para la correcta ejecución del modelo, pues en el contexto local se carece de esta información. Se deben hallar los grupos hidrológicos, la capacidad de agua disponible en el suelo, la conductividad hidráulica, el contenido de materia orgánica, el albedo del suelo y usle para completar la información requerida.

Con tal panorama y en relación con los objetivos planteados en este proyecto, se concluye que las instituciones encargadas de manejo de cuencas hidrográficas a

nivel local tienen la oportunidad de incorporar y actualizar periódicamente la información espacial y temporal requerida, de acuerdo a la posible selección de un software como base para la simulación de cuencas que aporte desde lo técnico a la toma de decisiones.



# CAPÍTULO V.

## RECOMENDACIONES



Universidad  
Católica  
de Manizales

## 5. RECOMENDACIONES

### DESDE LO TÉCNICO

Se considera fundamental que la información temporal de precipitación y temperatura que presenta vacíos de información significativa sea llenada, por lo cual se recomienda investigar métodos de estimación estadística de valores faltantes y completar así las series de temperatura y precipitación en los 11 años; así mismo los faltantes de información climática deben ser completados por medio de diferentes métodos de estimación para llenado de datos, esto evitando que el software no precise en los resultados arrojados y pueda generarse alta calidad y confiabilidad al momento de correr los datos.

Es necesario considerar una previa revisión de otras herramientas para una futura aplicación de la información en el modelo hidrológico de modelamiento (HEC-HMS, PRMS, TETIS, entre otros), pues SWAT requiere una gran cantidad de información detallada que permite un acercamiento a la realidad de la cuenca, pero al mismo tiempo puede ser un limitante para su uso en el contexto local, dado el estado de la información proporcionada.

### DESDE LO ACADÉMICO

A partir de ésta propuesta investigativa y en el marco del SEMILLERO DE GESTIÓN INTEGRAL DEL PATRIMONIO HÍDRICO del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Manizales, se proyecta un nuevo campo de estudio enfocado al análisis hidrológico a partir del modelamiento hídrico, desde el cual surgen unas líneas temáticas en el uso del SWAT como herramienta para el análisis de cuencas hidrográficas de alta complejidad, y se derivan temas posibles para otros ejercicios investigativos enfocados al estudio y profundización de la aplicación de la herramienta, como por ejemplo [1] completado o llenado de datos; [2] verificación de la información de suelos en campo; [3] simulación del modelo y análisis de resultados; [4] validación y calibración del modelo.

Consolidar una alianza estratégica interinstitucional en la que desde la universidad se aporte desde el conocimiento de la herramienta en la retroalimentación de información que generen las entidades locales encargadas del manejo del recurso hídrico de la ciudad y el departamento, para consolidar una visión prospectiva que aporte en la planificación del territorio, dado que la herramienta objeto de estudio de éste proyecto genera elementos concretos que permiten simular cambios sobre diferentes elementos constitutivos de las cuencas y que en la previsualización



misma de éstos otros escenarios posibles permitiría optimizar la toma de decisiones hacia una gestión ambiental efectiva.

#### DESDE LO INSTITUCIONAL

Por tanto, considerando el potencial del SWAT, y el estado de la información suministrada por las diferentes entidades locales, se recomienda a las instituciones encargadas de la toma de decisiones frente al manejo de cuencas hidrográficas en el departamento y la región, el uso de ésta herramienta principalmente para el modelado de cuencas hidrográficas de alta complejidad y dependiendo de la cuenca, revisar qué otro tipo de software pueda ser más conveniente para el análisis.

En consonancia con lo anterior es importante resaltar el esfuerzo que deben asumir las instituciones para migrar hacia sistemas o modelos de simulación hidrológica que les permitan una actualización de información y estar a la vanguardia en cuanto a herramientas que permitan manejo, actualización y procesamiento de datos, que en tiempos de cambio climático permitan evaluar desde diversos escenarios probables y desde una visión futura, el impacto de las actividades humanas sobre los suelos.

En consecuencia de ello, se recomienda a la academia agregar entre sus contenidos de pregrado de la Ingeniería Ambiental, los relacionados con el manejo de software para el modelado y simulación de cuencas hidrográficas, que en coherencia con éste ejercicio se hace referencia al SWAT, como herramienta que permite una lectura integral de la cuenca y que se incentive el conocimiento en ésta área desde los intereses ambientales enfocados al análisis de resultados y ordenamiento de cuencas hidrográficas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, F. (2012). Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa México, 291 p.
- Arnold, J. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: part I. Model development. *Revista Journal of the American Water Resources Association*, 34.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2016). *El desarrollo equitativo, competitivo y sostenible del sector agropecuario en Colombia*.
- Barbudo, L.; Ochoa, J.; & Verbel, E. (2016). *Aplicación del modelo SWAT en el estudio sedimentológico de la cuenca quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní, Departamento del Cesar*. Manizales..
- Barrios, A., & Urribarr, L. (2009). Aplicación del modelo swaT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 51(1) 2010, 11-29.
- Cascaredo, A., Oleschko, K., & Huerta, L. (2001). *Estimación de aofano y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote*. Revista Terra.
- Carrera, D. (2016). *Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media*. Chile: Revista Idesia, 82 p.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, SWAT2005. *CIAT-Centro Internacional de Agricultura Tropical*, 6.
- Corpocaldas. (2010). *Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora de Río Blanco y Quebrada Olivares*. Manizales, Caldas.
- Corpocaldas. (2010). *Reserva forestal protectora de las cuencas hidrográficas de Río Blanco y Quebrada Olivares*. Manizales.
- Dourojeanni, A. &. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*.
- ESRI. (2017). *ArcGIS Pro*. Obtenido de Explorar modelos digitales de elevación: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/exploring-digital-elevation-models.htm>
- Fernandez, B., & Francés, S. (s.f.). *Cartografía de suelos*.

- Gidahatari. (2013). *Métodos de estimación para completar datos de precipitación*. Obtenido de <http://gidahatari.com/ih-es/metodos-estimacion-completar-datos-precipitacion>.
- Golmohammadi, G., Rudra, R., Dickinson, T., Goel, P., & Veliz, M. (2017). Predicting the Temporal Variation of Flow Contributing Areas using SWAT. *Journal of Hydrology*.
- Greenlee, D. (1987). *"Raster and Vector Processing for Scanned Linework."*
- Hedberg, H. D. (1980). *Guía Estratigráfica Internacional*. New York: Reverté, S.A.
- Hernández, D. A. (2015). Estimación de los parámetros morfométricos u las unidades de respuesta hidrológica de la cuenca del Río Ráquira Departamento de Boyacá a través del programa SWAT. *Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos*. Bogotá D.C.
- IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *Modelación Hidrológica*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>
- IGAC. (2004). *Estudio General de Suelos, departamento de Caldas 2° Edición*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1995). *Conceptos básicos sobre sistemas de información geográfica y aplicaciones en Latinoamérica*. Bogotá D.C.
- Instituto Geográfico y Geológico de Cataluña. (2013). *ICGC*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá D.C.
- Natural Resources Conservation Services, USA. (2007). *National Engineering Handbook, Chapter 19: Transmissions Losses*. USA.
- Neitsch, S., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Texas: Texas Agricultural Experiment Station.
- Pajarito, X. J. (2017). Implementación del Modelo Hidrológico SWAT, como Herramienta para el Manejo del Recurso Hídrico en la Unidad Hidrológica Río Hacha-Florencia Caquetá. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD*.
- República de Colombia. (1974). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Bogotá D.C.

- República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Decreto 1640 de 2012, compilado en el Decreto 1076 de 2015*. Bogotá, DC.
- República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Bogotá, DC.
- República de Colombia, P. d. (29 de Enero de 1982). Ley 12 de 1982. Bogotá.
- República de Colombia, Presidente de la república de Colombia. (1974). Decreto-Ley 2811 de 1974. Bogotá.
- Rivera, N. U., Valencia, G. J., & CIAT. (2010). *Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: Caso cuenca del Río Tunjuelo-Cundinamarca*. Santiago de Cali.
- Ruiz, R., & Torres, H. (2008). Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas. *UICN SUR*.
- Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonia Colombiana-SIAT-AC. (2015). *Bosque denso alto de tierra firme*. Obtenido de <http://siatac.co/web/guest/productos/coberturasdelatierra>
- Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. (s.f.). *Web Soil Survey*. Recuperado el 29 de Abril de 2018, de <https://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/>
- Subgerencia Cultural del Banco de la República. (2015). *Cobertura vegetal*. Obtenido de [http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/cobertura\\_vegetal](http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/cobertura_vegetal)
- Universidad Nacional del Nordeste, F. d. (s.f.). *Guía de Trabajo Práctico*. Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/pub/hidrologia/hidro-tp2.pdf>
- Universidad de Los Andes Venezuela, (s.f). Precipitación datos englobados y faltantes.
- Vallejos Díaz, A. (2008). Forma de hacer un diagnóstico en la investigación científica. *Teoría y Praxis Investigativa, Volumen 3*.
- Velázquez, K. G. (2015). *La Cobertura y Uso del Suelo en la Producción de Sedimentos y Esgurrimientos Superficiales en la Cuenca El Tejocote, México, Mediante el Modelo Hidrológico SWAT*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Zambrano , J. (2016). Modelación con SWAT.

## ANEXOS

### Anexo A.

- Glosario.

Alófano: El término alófano es el nombre genérico que se da a un grupo de minerales no cristalinos del tamaño de la arcilla y que incluye en su composición química silicio, aluminio y agua ( $Al_2SiO_5 \cdot nH_2O$ ). El alófano se encuentra en muchos suelos, pero es común en los formados de materiales volcánicos. Los elementos del ambiente que controlan la formación del alófano son primordialmente el material geológico, la vegetación y el clima. En condiciones naturales, los suelos con alófano poseen un volumen grande pero cuando acontece una deshidratación éste disminuye de manera notable. (Cascaredo, Oleschko, & Huerta, 2001)

Áreas Misceláneas: Zonas de no suelo, como son las áreas urbanas, polígonos industriales, afloramientos rocosos, arenales, masas de agua, entre otros. (Fernandez & Francés)

Consociación de suelos: Hace referencia a las diversas clases de unidades cartográficas, específicamente son unidades sencillas, constituidas por una sola clase de suelo. (Fernandez & Francés)

Diagnóstico: es el resultado final o temporal de la tendencia del comportamiento del objeto de estudio que deseamos conocer, en un determinado contexto-espacio-tiempo, a través de sus funciones y principios que lo caracterizan como tal (Vallejos Díaz, 2008).

Doble Masa: La técnica doble masa se emplea cuando se quiere comprobar si los registros de una estación pluviométrica, anuales o estacionales, no han sufrido variaciones que conduzcan a valores erróneos. (Universidad Nacional del Nordeste)

Estructura ráster: En la cual los objetos del paisaje se describen con una o varias celdas encadenadas que no se superponen ni tienen espacios vacíos entre ellas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1995)

Eratema: Un eratema (de las raíces griegas *era* y *them*, “depósito de una era”) es la mayor de las unidades formales reconocidas comúnmente en la jerarquía cronoestratigráfica y, por regla general consiste en varios sistemas adyacentes. Tradicionalmente, los eratemas se han nombrado de modo que reflejen los grandes cambios ocurridos durante el desarrollo de la vida sobre la tierra: Paleozoico (vida antigua), Mesozoico (vida intermedia) y Cenozoico (vida reciente). (Hedberg, 1980)

MAGNA SIRGAS: Sistema referencial oficial de Colombia.

Modelo de elevación digital (DEM): Es una representación de raster de una superficie continua, que en general hace referencia a la superficie de la tierra (ESRI, 2017).

Modelo hidrológico: Representación simplificada de la realidad; es el prototipo de una cuenca hidrológica en el cual interactúan todas sus variables.

Modelo: Un modelo es un conjunto de relaciones o informaciones acerca del mundo real que simula e intenta predecir el comportamiento de los fenómenos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1995).

ONI: Es un índice construido por el Centro de Predicción Climática de la NOAA, generado a través del comportamiento de la temperatura superficial en la región central del océano Pacífico tropical, para determinar la ocurrencia de un evento “El Niño” o “La Niña”. (IDEAM, 2010)

Sistemas de Información geográfica: Es un conjunto de hardware, software, datos geográficos, personas y procedimientos organizados para capturar, almacenar y actualizar datos geográficos utilizando adecuados canales de comunicación. Es diseñado para ser leído por el computador, limitado por los recursos informáticos con contenidos ampliables según las necesidades y posee una facilidad para generar productos derivados (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, 1995).

Shapefile: Es un formato de almacenamiento de datos vectoriales para almacenar la ubicación, la forma y los atributos de las entidades geográficas (ESRI, 2017).

Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Es una herramienta que permite el modelamiento hidrológico de una Cuenca. SWAT es un modelo continuo de tiempo a largo plazo diseñado para simular múltiples acontecimientos; requiere información de múltiples variables climáticas, hidrológicas, topográficas, entre otras (Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, 2010).

Tabla Cronoestratigráfica: La tabla cronoestratigráfica internacional describe los tiempos geológicos en los que se inscribe la historia de la Tierra. Combina una escala numérica que utiliza como unidad el millón de año (escala cronométrica) y una escala que se expresa en unidades de tiempo relativas (escala cronoestratigráfica). (Instituto Geográfico y Geológico de Cataluña, 2013)

Unidad litológica: Una unidad litológica es un cuerpo rocoso que presenta características de composición química y mineralógica más o menos homogéneas, tiene límites definidos con otras unidades y una edad de formación determinada. (Instituto Geográfico y Geológico de Cataluña, 2013)

## **Anexo B.**

INFORMACIÓN	TIPO DE INFORMACIÓN	FUENTE	FORMATO DE ORIGEN
Modelo de Elevación Digital (DEM)			
Drenajes de la cuenca			
Tipos de suelos			
Cobertura y uso de la tierra			
Localización de estaciones meteorológicas y pluviométricas			
Temperatura (2010-2016)			
Precipitaciones (2010-2016)			

Anexo B. Tabla de recopilación de información. Fuente: Autor.

### Anexo C.

Nombre	Formato	Descripción
ID	Entero	Número de identificación del aforo.
NAME	Texto Max 8 caracteres	Corresponde al nombre de la tabla*
XPR	Punto flotante	Coordenada X en la proyección definida
YPR	Punto flotante	Coordenada Y en la proyección definida
LAT	Punto flotante	Latitud en décimas degree
LONG	Punto flotante	Longitud en décimas degree

Anexo C. Formato tabla localización. Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)

\*El nombre de la tabla la cual tiene los datos de temperatura y precipitación (Ej: pcp.dbf).

### Anexo D.

Nombre	Formato	Descripción
VALUE	Entero	Número de categoría del mapa
LANDUSE	Texto 4 Caracteres	Corresponde al código interno de la Base de datos de SWAT de Uso de la tierra.

Anexo D. Formato de la tabla atributos de Uso del Suelo (.dbf). Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)

### Anexo E.

Nombre	Formato	Descripción
VALUE	Texto	Número de categoría del mapa
NAME	Texto 30 Caracteres máximo	Prefijo del nombre del archivo conteniendo datos de suelos para la categoría

Anexo E. Formato de tabla de atributos de suelo. Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)

### Anexo F.

Nombre	Formato	Descripción
DATE	Fecha	Fecha del aforo
PCP	Punto flotante (f5.1)	Cantidad de precipitación (mm)

Anexo F. Formato de la tabla (2 campos). Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)

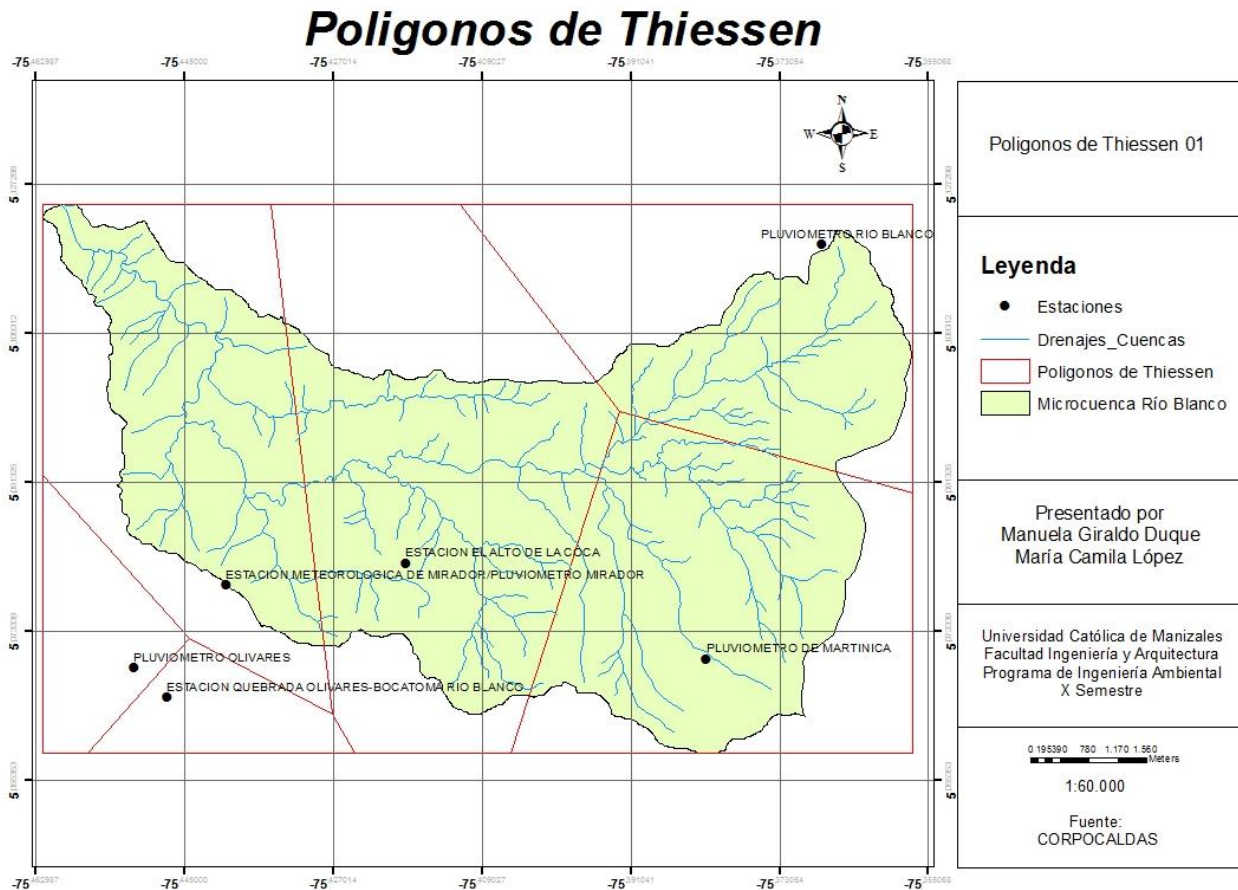
### Anexo G.



Nombre	Formato	Descripción
DATE	Fecha	Fecha de medición
MAX	Punto flotante (f5.1)	Temperatura máxima diaria (°C)
MIN	Punto flotante (f5.1)	Temperatura mínima diaria (°C)

*Anexo G. Formato de tabla (3 campos). Fuente: (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2010)*

## Anexo H.



Anexo H. Polígonos de Thiessen de las estaciones y pluviómetros. Fuente: Autor.

## Anexo I.

AÑO	FALTANTES PLUVIÓMETRO MARTINICA	% DE FALTANTES
2006	Falta el día 31/05/2006	1%
2007	COMPLETO	0%
2008	COMPLETO	0%
2009	COMPLETO	0%

<b>AÑO</b>	<b>FALTANTES PLUVIÓMETRO MARTINICA</b>	<b>% DE FALTANTES</b>
2010	COMPLETO	0%
2011	COMPLETO	0%
2012	COMPLETO	0%
2013	COMPLETO	0%
2014	COMPLETO	0%
2015	COMPLETO	0%
2016	Faltan el mes de noviembre y diciembre	16%

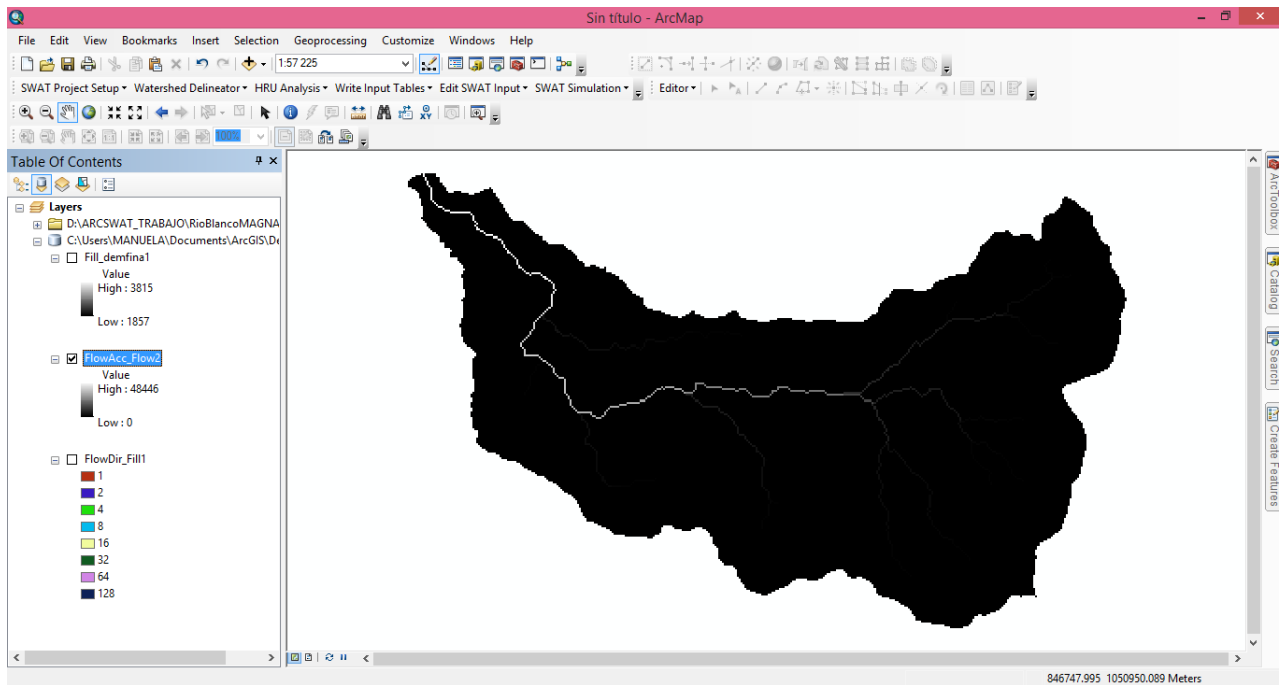
*Anexo I. Datos faltantes del pluviómetro Martinica. Fuente: Autores.*

#### **Anexo J.**

<b>AÑO</b>	<b>FALTANTES PLUVIÓMETRO MIRADOR</b>	<b>% DE FALTANTES</b>
2006	COMPLETO	0%
2007	COMPLETO	0%
2008	COMPLETO	0%
2009	COMPLETO	0%
2010	COMPLETO	0%
2011	COMPLETO	0%
2012	COMPLETO	0%
2013	COMPLETO	0%
2014	COMPLETO	0%
2015	COMPLETO	0%
2016	Faltan el mes de noviembre y diciembre	16%

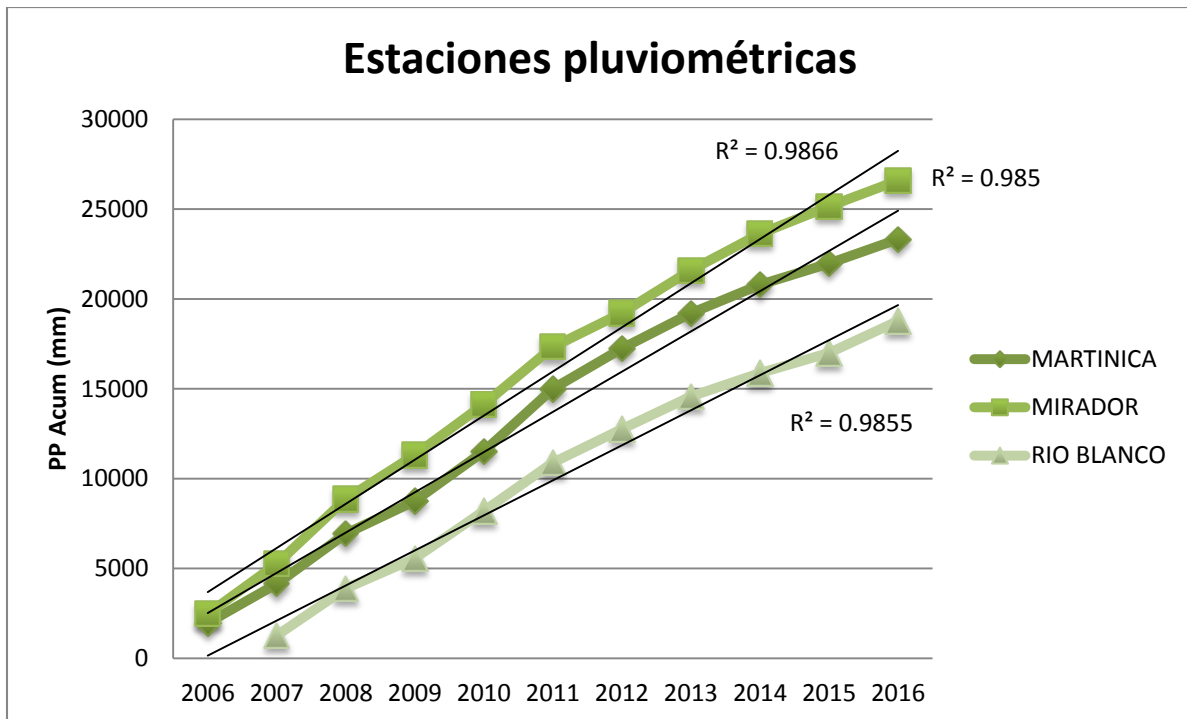
*Anexo J. Datos faltantes del pluviómetro Mirador. Fuente: Autores.*

#### **Anexo K.**



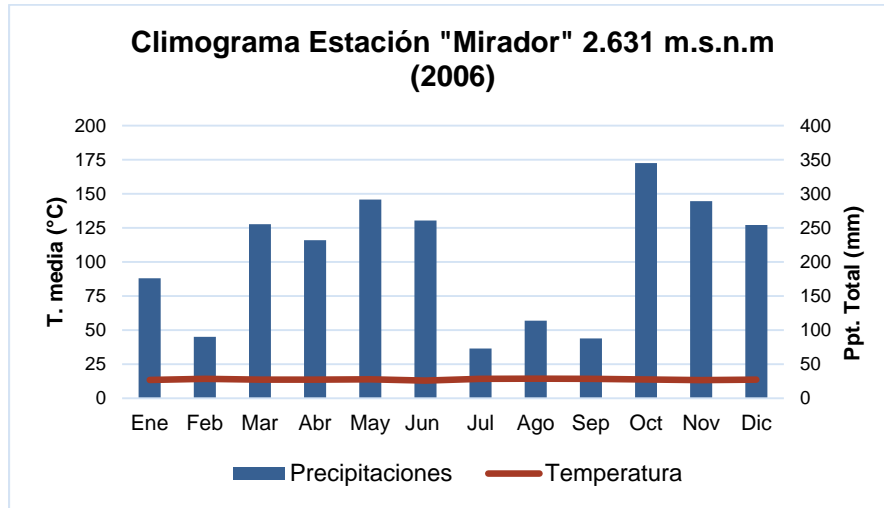
Anexo K. Demostración de acumulación de flujo. Fuente: Autores.

## Anexo L.



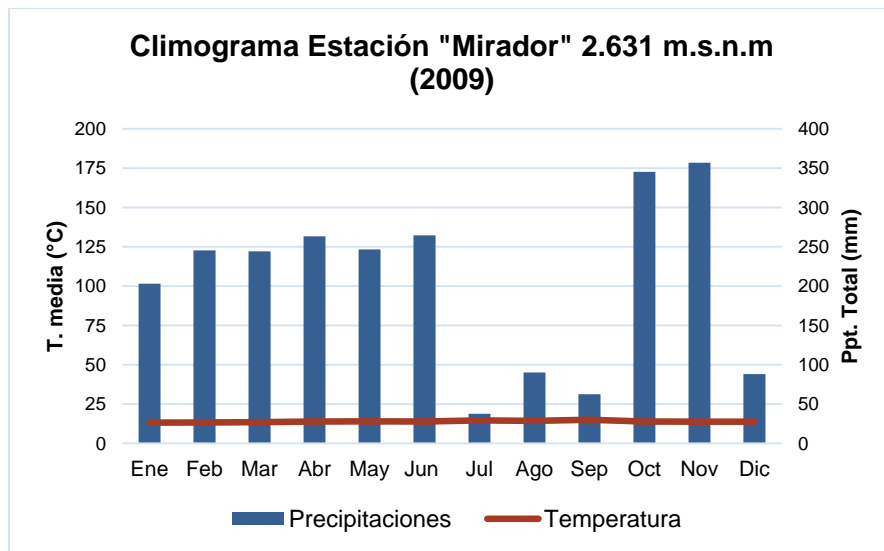
Anexo L. Estación pluviométrica base. Fuente: Autor.

## Anexo M.



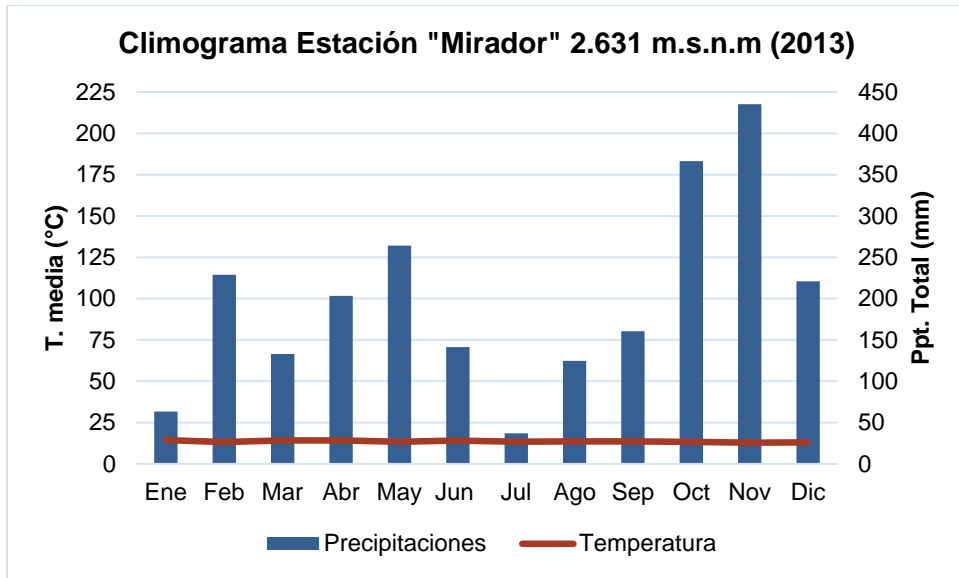
Anexo M. Climograma año 2006. Fuente: Autores.

## Anexo N.



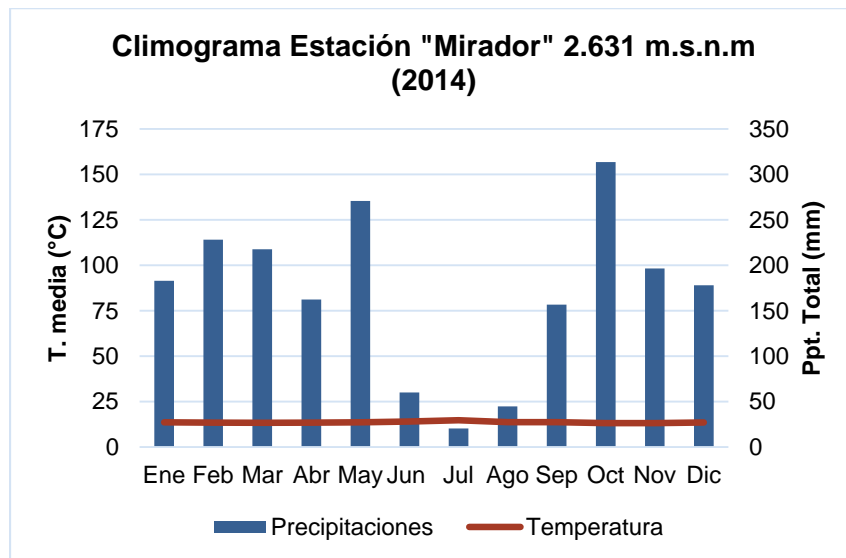
Anexo N. Climograma año 2009. Fuente: Autores.

## Anexo O.



Anexo O. . Climograma año 2013. Fuente: Autores.

## Anexo P.



Anexo P. . Climograma año 2009. Fuente: Autores.